



**HAL**  
open science

# Étude sur le transfert en temps réel de la hauteur de l'anneau de stockage de l'ESRF au sol du hall expérimental en utilisant le système de nivellement hydrostatique

Camille Favre

► **To cite this version:**

Camille Favre. Étude sur le transfert en temps réel de la hauteur de l'anneau de stockage de l'ESRF au sol du hall expérimental en utilisant le système de nivellement hydrostatique. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2015. dumas-01337851

**HAL Id: dumas-01337851**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01337851>**

Submitted on 27 Jun 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS**  
**ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES**

---

**MÉMOIRE**

présenté en vue d'obtenir

le **DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM**

**SPÉCIALITÉ : Géomètre et Topographe**

par

**Camille FAVRE**

---

Étude sur le transfert en temps réel de la hauteur de l'anneau de stockage de  
l'ESRF au sol du hall expérimental en utilisant le système de nivellement  
hydrostatique

**Soutenu le 6 juillet 2015**

---

**JURY**

**PRESIDENT :** Monsieur Laurent POLIDORI

**MEMBRES :** Monsieur Stéphane DURAND, professeur référent  
Monsieur Gilles GATTA  
Madame Anaëlle LELEU  
Monsieur Vivien RUDE

---

**Maître de stage :** Monsieur David MARTIN



# REMERCIEMENTS

Je tiens dans un premier temps à remercier de manière générale l'ensemble des membres du groupe Alignement et Géodésie (ALGE) de l'ESRF, tant pour l'accueil qu'ils m'ont réservé que pour l'aide qu'ils m'ont fournie tout au long de ces vingt semaines de travail. Je souhaite tout particulièrement remercier Monsieur David MARTIN, mon maître de stage, chef du groupe ALGE, de m'avoir offert l'opportunité d'effectuer ce projet ainsi que ses conseils et la confiance qu'il m'a accordée.

Dans un second temps, mes plus vifs remerciements vont à Monsieur Gilles GATTA pour sa disponibilité et ses conseils avisés dans les tâches qui m'ont été confiées tout au long du projet. Je tiens également à remercier Monsieur Bruno PERRET pour son aide précieuse en m'assistant techniquement tout au long de mon Travail de Fin d'Études (TFE) et en me consacrant beaucoup de son temps.

Pour m'avoir transmis ses connaissances sur le système de nivellement hydrostatique utilisé au sein de l'ESRF, je tiens à remercier Monsieur Laurent MALEVAL. Et je remercie également Messieurs Christophe LEFEVRE, Daniel SCHIRR-BONNANS et Noël LEVET pour leur accueil et pour m'avoir fait partager leurs expériences.

Je souhaite enfin remercier Monsieur Stéphane DURAND, professeur référent, pour m'avoir suivi tout au long de ce TFE.

# GLOSSAIRE

<b>ALGE</b>	Service Alignement et Géodésie de l'ESRF, le service s'occupe des alignements et positionnements des éléments de la machine ainsi que du maintien du réseau spatial servant de référence
<b>Booster</b>	Accélérateur circulaire
<b>Cellule</b>	Partie de l'anneau de stockage
<b>ESRF</b>	European Synchrotron Radiation Facility
<b>GCP</b>	Global Compensation Program, logiciel utilisé à l'ESRF pour le traitement des mesures
<b>HLS</b>	Hydrostatic Levelling System, système de mesures par nivellement hydrostatique
<b>LabVIEW</b>	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, un langage de programmation graphique
<b>LINAC</b>	Linear Accelerator
<b>Machine</b>	Ensemble des éléments du LINAC, du Booster et de l'anneau de stockage
<b>MDT</b>	Machine Dedicated Time
<b>Shutdown</b>	Période réservée à la maintenance de la machine avec coupure du faisceau
<b>SM</b>	Survey Monument
<b>SR</b>	Storage Ring ou anneau de stockage
<b>ZFL</b>	Z Floor, nom des points au sol dans le hall expérimental

# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>Remerciements</b> . . . . .	2
<b>Glossaire</b> . . . . .	3
<b>Introduction</b> . . . . .	6
<b>1 L'ESRF et la topométrie de précision</b>	<b>8</b>
1.1 Le fonctionnement de l'ESRF . . . . .	8
1.2 L'ESRF et la détermination des altitudes . . . . .	9
1.2.1 Les campagnes de nivellement . . . . .	9
1.2.2 Description des campagnes de nivellement . . . . .	10
1.2.3 L'utilisation du nivellement hydrostatique . . . . .	13
<b>2 Détermination du transfert des hauteurs de l'anneau de stockage aux lignes de lumière</b>	<b>17</b>
2.1 Description de la méthode . . . . .	17
2.1.1 Introduction . . . . .	17
2.1.2 Principe général . . . . .	18
2.1.3 Principe détaillé . . . . .	20
2.2 Choix du matériel et prise de mesures . . . . .	23
2.3 Traitement des mesures . . . . .	24
2.4 Analyse des résultats . . . . .	26
2.4.1 Les corrections à réaliser . . . . .	26
2.4.2 La précision des appareils . . . . .	27
2.4.3 Les premiers résultats . . . . .	29
2.4.4 Conclusion . . . . .	30
2.5 Calcul d'incertitudes . . . . .	30
2.5.1 Évaluation de type A de l'incertitude . . . . .	30
2.5.2 Évaluation de type B de l'incertitude . . . . .	31
2.5.3 Calcul global . . . . .	36
<b>3 Amélioration de la méthode et mise en oeuvre pratique</b>	<b>38</b>
3.1 Vers une méthode de transfert précis . . . . .	38
3.1.1 Possibilité de la réduction des visées . . . . .	38
3.1.2 Amélioration du calcul d'incertitudes . . . . .	39
3.1.3 Détermination de la constante du capteur pour le zéro de lecture . . . . .	41
3.1.4 Étude des polynômes de correction appliqués aux différents capteurs HLS . . . . .	43
3.1.5 Conclusion . . . . .	45
3.2 Détermination de la fréquence des mesures . . . . .	47
3.2.1 Évolution des poutres de l'anneau de stockage . . . . .	47
3.2.2 Mesures de transfert du SR au toit . . . . .	47
3.2.3 Mesures de transfert du toit aux ZFL . . . . .	48
3.2.4 Conclusion . . . . .	49
3.3 Mise en oeuvre pratique . . . . .	49
3.3.1 L'application terrain . . . . .	49
3.3.2 Le traitement des mesures . . . . .	50
3.4 La méthode proposée aurait-elle ses propres limites ? . . . . .	51
3.4.1 Automatisation du procédé . . . . .	51
3.4.2 La comparaison générale . . . . .	52
<b>Conclusion</b> . . . . .	54
<b>Bibliographie [.]</b> . . . . .	56
<b>Poster Scientifique</b> . . . . .	57
<b>Résumé</b> . . . . .	60



# INTRODUCTION

L'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), situé au confluent du Drac et de l'Isère à Grenoble, est un pôle de recherche européen. Ouvert depuis 1990, il met à disposition des scientifiques les rayons X les plus brillants d'Europe, afin d'explorer la matière sous toutes ses formes.

Le groupe Alignement et Géodésie est responsable de l'installation, du contrôle et du réalignement périodique des éléments au sein de la machine ou des lignes de lumière. Cela permet de maintenir la forme géométrique de la machine et le réseau spatial à jour. Ainsi est obtenue la production de rayons X d'une haute qualité.

De ce fait, les membres du groupe sont fortement spécialisés dans les techniques de métrologie et micro géodésie, appliquées au domaine des accélérateurs de particules.



FIGURE 1 – Vue de l'ESRF [1]

Les tolérances d'alignement au sein de l'ESRF sont typiquement inférieures au millimètre et suivant les demandes seulement de quelques micromètres.

La situation de l'entreprise, près de nappes phréatiques, d'un barrage ainsi que la proximité des montagnes, entraîne de faibles mouvements de terrain qui prennent de l'importance de par les tolérances exigées. Ces mouvements ont pour conséquence de fortes variations des coordonnées des points du réseau géodésique, principalement selon la composante verticale.

Ainsi, pour garantir cette précision, par exemple sur les lignes de lumière, où se situent les expériences à proprement dites, il est alors nécessaire d'effectuer régulièrement une mise à jour des coordonnées des points du réseau géodésique en altimétrie à travers des campagnes de nivellement.

Toutefois, l'altitude du faisceau de rayon X dans la machine étant prise comme référence, le rattachement des points de nivellement ne peut s'effectuer que lors de Shutdowns, autrement dit lors de l'arrêt machine qui signifie la coupure du faisceau.

Les Shutdowns sont seulement au nombre de cinq dans l'année. Cette contrainte oblige à utiliser des altitudes, qui, lors de demandes de travaux dans un laps de temps très court par rapport à la fin du Shutdown, semblent représenter la réalité mais qui, au bout de quelques mois voire quelques semaines, peuvent être jugées comme faussées et non fiables de par ces mouvements de terrain.

Ainsi, il est nécessaire de trouver un moyen de s'affranchir du besoin de l'arrêt machine pour pouvoir se rattacher à l'altitude de référence, celle du faisceau.

L'ESRF est équipé depuis plusieurs années déjà du système de nivellement hydrostatique.



**FIGURE 2** – Utilisation d'un réseau HLS pour l'étude des mouvements d'une dalle [1]

En général, les capteurs HLS fournissent des mesures permettant la surveillance et le diagnostic de comportement d'ouvrage, comme l'explique à juste titre l'article éponyme de la revue XYZ [2].

Ce système autonome permet d'observer des mouvements altimétriques en se basant sur le principe des vases communicants dont la surface d'un liquide est prise comme référentiel de mesure.

L'ESRF s'est donc équipé de cette technologie afin d'observer tout mouvement qui pourrait engendrer des conséquences sur des éléments principaux du site. De ce fait, plusieurs réseaux de capteurs HLS sont installés.

Ainsi, de par une réalisation peu fréquente des campagnes de nivellement, il a été demandé de concevoir une étude sur le transfert en temps réel de la hauteur de l'anneau de stockage vers le hall expérimental, en utilisant le système de nivellement hydrostatique déjà présent. Cela permet de déterminer l'altitude des points de nivellement, situés dans la couronne périphérique, qui servent de référence pour les lignes de lumière.

Pour cela, nous essayerons de répondre aux questions suivantes : est-ce faisable ? Quelle précision peut-on attendre sur les lignes de lumière ? Est-ce que cette méthode est plus adaptée que celle employée lors des campagnes de nivellement ?

Dans un premier temps, nous verrons le site, ses différents composants majeurs ainsi que le rôle des altitudes et le système HLS. Puis, nous étudierons une méthode de transfert possible de cette hauteur, que nous comparerons avec les campagnes de nivellement. Enfin, nous essayerons d'améliorer cette méthode en déterminant notamment la fréquence nécessaire des mesures et nous expliquerons sa mise en oeuvre pratique.

# 1 L'ESRF et la topométrie de précision

## 1.1 Le fonctionnement de l'ESRF

Le site de l'ESRF peut être décomposé en deux grandes parties :

- la machine qui crée et stocke la lumière synchrotron nécessaire aux expériences, constituée de l'accélérateur linéaire, du booster synchrotron et de l'anneau de stockage,
- les lignes de lumière qui accueillent les différentes expériences.

L'accélérateur linéaire, appelé aussi LINAC, est un canon à électrons. Il permet non seulement de propulser mais aussi d'accélérer ces électrons dans une chambre à vide à l'aide d'un champ magnétique. Ensuite les électrons sont dirigés vers le booster synchrotron, 300 m de circonférence, afin qu'ils puissent atteindre une énergie finale de 6 GeV à l'aide des cavités accélératrices présentes. Enfin, une fois l'énergie atteinte, les électrons sont redirigés vers l'anneau de stockage, SR, 844 m de circonférence, où leur énergie restera constante.

Les électrons à très haute énergie sont contraints de suivre une trajectoire courbe de par la présence des aimants de courbure, produisant ainsi une onde électromagnétique constituant le rayonnement synchrotron. Cette lumière, émise tangentielle à la courbure du faisceau d'électrons est ainsi dirigée vers les lignes de lumière dans le hall expérimental.

Les lignes de lumière, situées dans le hall expérimental, sont quant à elles composées de :

- une cabine optique qui conditionne le faisceau par le biais d'instruments optiques tels que miroirs, monochromateurs, fentes, filtres, donnant à la lumière les caractéristiques souhaitées pour l'expérience,
- une cabine d'expérience où se situe l'échantillon dont la position est précise,
- une cabine de contrôle comprenant la direction de l'expérience mais aussi la possibilité de recueillir et d'analyser directement les données.

Tout au long d'une année cinq Shutdowns sont réalisés. Ils consistent en l'arrêt complet de la machine afin d'en effectuer sa maintenance.

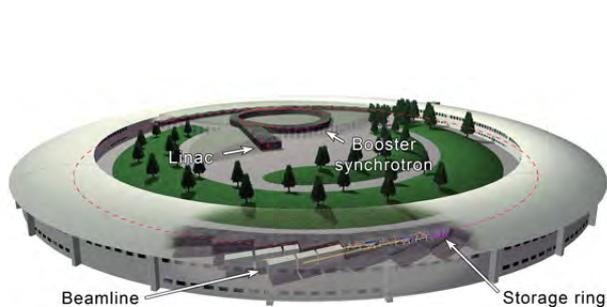


FIGURE 3 – Schéma d'un synchrotron [1]

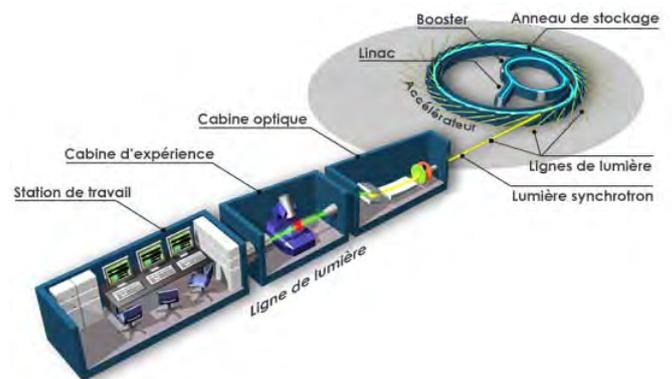


FIGURE 4 – Schéma d'une ligne de lumière [1]

La qualité du rayonnement dépend de la brillance des rayons X. Cela signifie qu'il faut qu'ils soient le plus intense, le plus fin et le plus stable possible. Pour ce faire, les électrons doivent non seulement être fortement focalisés mais également circuler dans un tube présentant un vide extrême (10 mbar). Ainsi cela nécessite que leur trajectoire soit parfaitement contrôlée et que tous les éléments de l'anneau de stockage soient alignés très précisément.

De ce fait, au sein de l'anneau de stockage, la trajectoire des électrons est contrôlée par différents types d'aimants :

- **les aimants de courbure** constitués de dipôles qui dévient les électrons de leur trajectoire rectiligne en une courbe la plus proche possible d'un cercle. Les lignes de lumière sont situées dans le prolongement du dipôle afin d'y accueillir la lumière synchrotron ainsi créée,
- **les aimants de focalisation** constitués de quadrupôles et de sextupôles qui permettent au faisceau de conserver un diamètre le plus petit possible en le focalisant dans les directions horizontales et verticales, corrigeant ainsi la dispersion de l'énergie du faisceau appelée chromatique,
- **les dispositifs d'insertion** qui font osciller les électrons les rendant plus intenses et dont les résidus constituent une lumière différente qui se dirige également vers une ligne de lumière spécifique.

Ces différents éléments sont regroupés et fixés sur des poutres. Les poutres constituent des blocs indéformables dont les éléments sont solidaires. De ce fait, nous ne tenons plus compte que de l'entrée et de la sortie de chaque poutre.

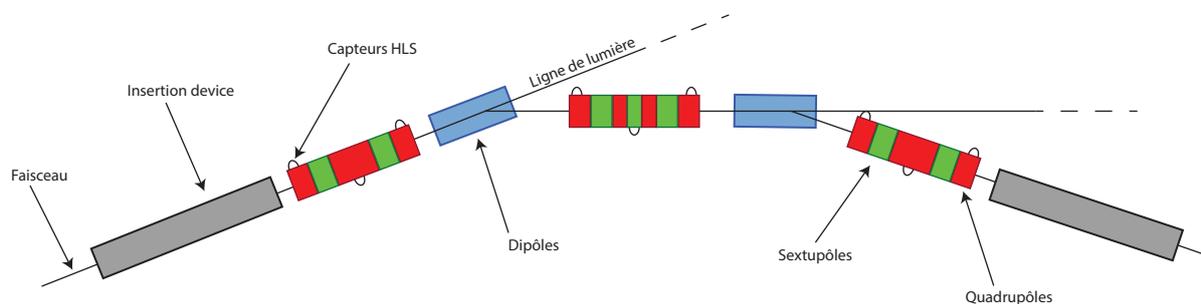


FIGURE 5 – Schéma d'une cellule

L'anneau de stockage est divisé en 32 cellules. Chaque cellule est composée de poutres agencées suivant un certain ordre afin que les éléments fixés dessus puissent contrôler la trajectoire des électrons. La *Figure 5* présente non seulement l'agencement des différentes poutres, représentées sous forme rectangulaire, exceptées les insertions device, mais aussi l'emplacement des capteurs HLS et des départs de lignes de lumière, au sein d'une cellule.

## 1.2 L'ESRF et la détermination des altitudes

### 1.2.1 Les campagnes de nivellement

Depuis toujours, tous les réseaux de référence présents à l'ESRF sont déterminés localement. De par la spécificité de l'entreprise, le système utilisé est un système de coordonnées plan et local, ne faisant référence à aucun système géodésique de référence légal.

Concernant plus particulièrement la composante verticale, de par l'importance que représente le faisceau d'électrons au sein du site, sa position est cruciale. Ainsi ce dernier sert de référence pour les altitudes. Étant donné qu'il est difficile de connaître la position exacte du faisceau à un instant  $t$ , car non mesurable directement, il est alors considéré qu'entre le faisceau d'électrons et des points de repère, appelés Survey Monuments et situés sur les éléments des poutres, la distance est constante.

Actuellement, la détermination des altitudes des points de référence, qui sont situés dans le hall expérimental au niveau des lignes de lumière, ne peut se réaliser qu'en période de Shutdowns par nivellement direct, autrement dit, tous les 2 à 3 mois.

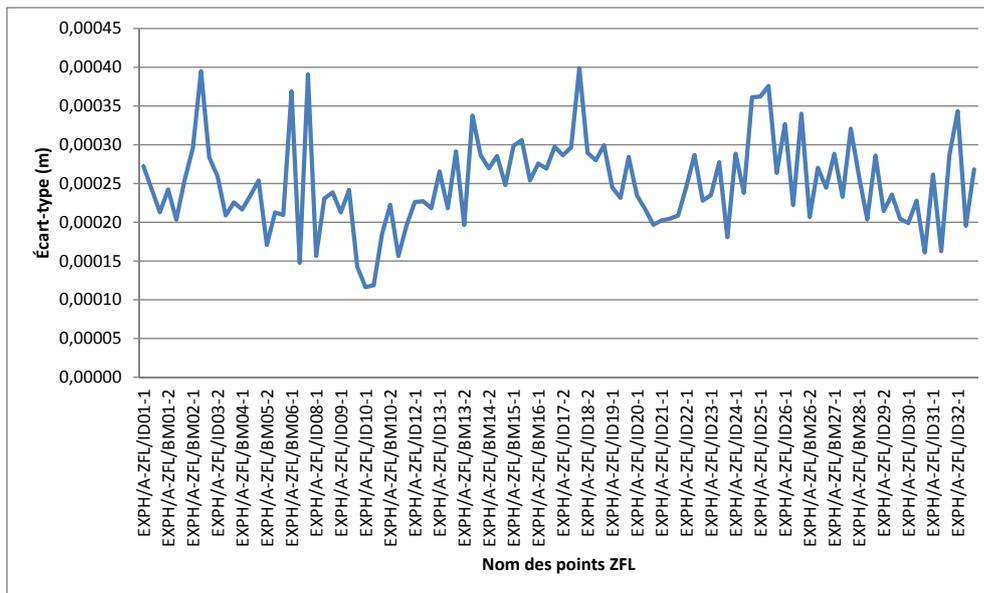


FIGURE 6 – Écart-types des observations des points ZFL pendant trois ans suite aux mouvements de terrain

De plus, une étude a été réalisée par le groupe pour évaluer l’amplitude de variation des mouvements de terrain que l’on peut observer au sein du site. Ainsi les mesures des points ZFL du hall expérimental sur une période de trois ans ont été analysées. Les écarts-types issus des observations associés à chaque point ZFL sont recensés dans le graphique ci-dessus. Nous pouvons constater qu’en moyenne les points ont un écart-type de 0,25 mm. L’amplitude de variation est de 0,32 mm à 1,74 mm sur une période de trois ans.

De ce fait, les valeurs prises lors des Shutdowns ne peuvent être considérées comme vraies que dans un délai temporel proche de la prise de mesures. Au-delà d’un certain temps, de par ces mouvements de terrain, les coordonnées des points au sol sont réputées ne plus être correctes.

### 1.2.2 Description des campagnes de nivellement

Les campagnes de nivellement s’effectuent lors de l’arrêt machine appelé Shutdown. Étant donné la présence perpétuelle de mouvements du site, elles permettent la redétermination des coordonnées de l’ensemble des points des différents réseaux de référence. La prise de mesures des campagnes de nivellement, effectuée tous les 2 à 3 mois, est sous-traitée à une entreprise externe de géomètres.

Il existe deux types de Shutdowns :

- les "petits Shutdowns" ne durent qu’une semaine,
- les "grands Shutdowns", au nombre de deux généralement en août et en décembre, durent environ trois semaines.

Ainsi lors des "petits Shutdowns" seuls les repères altimétriques sont considérés contrairement aux "grands Shutdowns" où la planimétrie et l’altimétrie sont traitées pour l’ensemble des points.

Les campagnes de nivellement consistent en :

- des mesures à l’intérieur de l’anneau de stockage sur des points de référence situés sur les poutres, appelés Survey Monuments, ainsi que des visées sur des prismes posés sur des potences ou supports magnétiques à l’extérieur de l’anneau par le biais de fenêtres,
- des mesures du réseau constitué de tous les points présents dans le hall expérimental,
- le rattachement des points présents dans le hall expérimental à l’anneau de stockage par l’intermédiaire des potences.

## Les mesures effectuées dans l'anneau de stockage

Les mesures effectuées au sein de l'anneau de stockage sont principalement des visées sur des Survey Monuments (SM) qui sont des repères, situés sur les différents éléments montés sur les poutres, matérialisant un point précis, dont la *Figure 15* (page 15) est une représentation. Selon Benoît PASSOT [3], en suite d'une vérification expérimentale qu'il a effectué, les poutres sont considérées comme indéformables au niveau de précision considéré, ainsi les mesures ne sont réalisées que sur deux Survey Monuments par poutre, ceux des extrémités.

Les stations effectuées sont au nombre total de 64 avec 20 points mesurés par station le tout réalisé deux fois par deux équipes différentes. Tous les points possibles sont visés, allant jusqu'à 40 m de portée. Seulement il s'est avéré que si tous les points étaient pris pour la détermination de l'altitude, il y avait une perte de précision due aux visées lointaines qui sont moins précises ainsi qu'une erreur de collimation résiduelle (cf. page 22). Ainsi il a été décidé de se limiter aux visées inférieures à 15 m. Deux types de stations sont faites et représentées sur la *Figure 7* :

- une station au milieu d'une cellule permettant d'avoir les différents points de la cellule concernée,
- une station entre deux cellules dont les visées possibles sont celles de la deuxième moitié de la cellule précédente, excepté le dernier SM, et celles de la première moitié de la cellule suivante, excepté le premier SM.

Pour faciliter la mise en oeuvre de ces stations, un marquage au sol spécifie l'emplacement des trépieds. Les appareils utilisés subissent une calibration avant chaque Shutdown.

Jusqu'en mars 2013, les mesures dans l'anneau de stockage se faisaient exclusivement avec un niveau DINI12. Après cette date, les mesures ont été réalisées au niveau DINI12 et au Tracker Leica AT401 sans différence notable. Ainsi, à partir d'août 2013, les mesures ont été effectuées à l'aide uniquement de l'AT401. L'utilisation de cet appareil donne la possibilité de faire des relevés planimétriques et altimétriques en même temps ce qui est une économie de temps et d'effort.

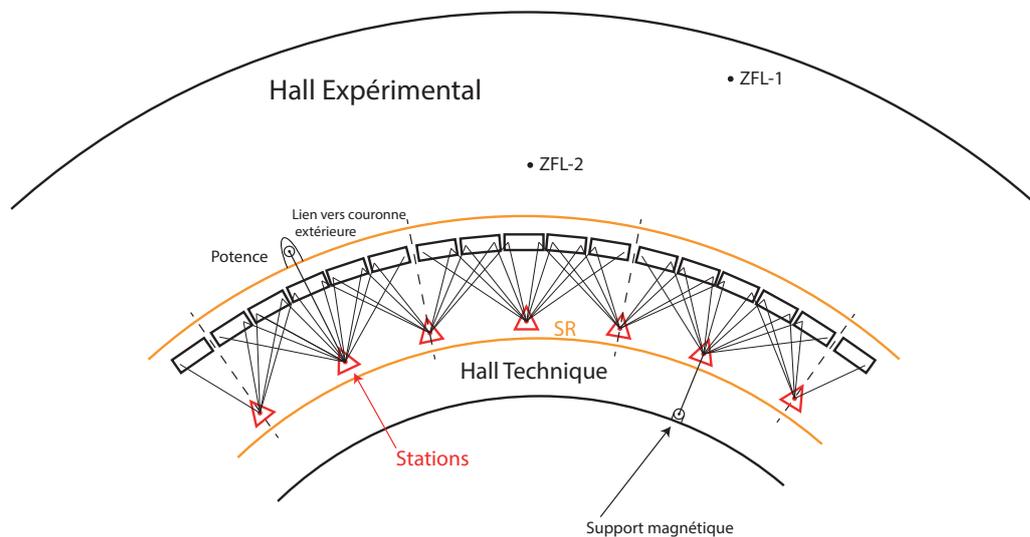


FIGURE 7 – Schéma des visées prises au sein de l'anneau de stockage

La *Figure 7* permet de visualiser les différentes visées effectuées au sein de l'anneau de stockage.

Du fait que les portées soient toutes inférieures à 15 m, la correction du niveau apparent est négligée dans le traitement des mesures. Ces mesures sont effectuées lors de chaque Shutdown.

## **Les mesures effectuées dans le hall expérimental**

Deux types de réseaux existent au sein du hall expérimental :

- le réseau de points ZFL (Z Floor) constitué de tous les points au niveau du sol,
- le réseau de points composé de supports magnétiques.

Lors de chaque Shutdown, le réseau de points ZFL est mesuré par nivellement direct à l'aide du DINI12 en effectuant le tour de la couronne extérieure, et l'ensemble des points comprenant les points ZFL et ceux matérialisés par des supports magnétiques sont relevés à l'aide de l'AT401 lors des "grands Shutdowns".

Comme le montre la *Figure 8* ci-après, nous pouvons observer le réseau de points de référence situé dans le hall expérimental. Nous avons les points ZFL situés au milieu de la couronne périphérique ainsi qu'au niveau des lignes de lumière où les visées relient le toit de l'anneau de stockage à la couronne, puis nous avons les autres points composés de supports magnétiques présents sur les murs, piliers du bâtiment.

## **Les mesures effectuées pour le rattachement**

Le rattachement permet de relier les visées faites dans l'anneau de stockage à travers les différentes fenêtres disponibles et les mesures réalisées dans le hall expérimental afin de connaître tous les points du réseau selon le faisceau d'électrons pris comme référence.

Pour ce faire, le rattachement s'effectue différemment selon le temps mis à disposition lors des différents Shutdowns.

Ainsi, lors des "petits Shutdowns", seule une manipulation est réalisée. Le rattachement des mesures entre l'intérieur et l'extérieur de l'anneau de stockage se réalise à l'aide uniquement de trois fenêtres présentes dans le mur extérieur du cercle de l'anneau de stockage, fermées par des briques de plomb en dehors des Shutdowns. Lorsque la station à l'intérieur de l'anneau de stockage le permet, une visée est effectuée à travers la fenêtre sur un prisme placé sur la potence située de l'autre côté du mur.

Lors des "grands Shutdowns", une manipulation supplémentaire est faite. Des visées à travers des fenêtres situées dans le mur intérieur du cercle de l'anneau de stockage sont réalisées, permettant de viser des supports magnétiques présents sur le mur du hall technique, de l'autre côté du hall expérimental par rapport à l'anneau de stockage.

De ce fait les potences sont directement reliées avec les mesures du hall expérimental et les supports magnétiques y sont automatiquement reliés par le biais de stations réalisées sur le toit de l'anneau de stockage permettant la visibilité entre les deux parties.

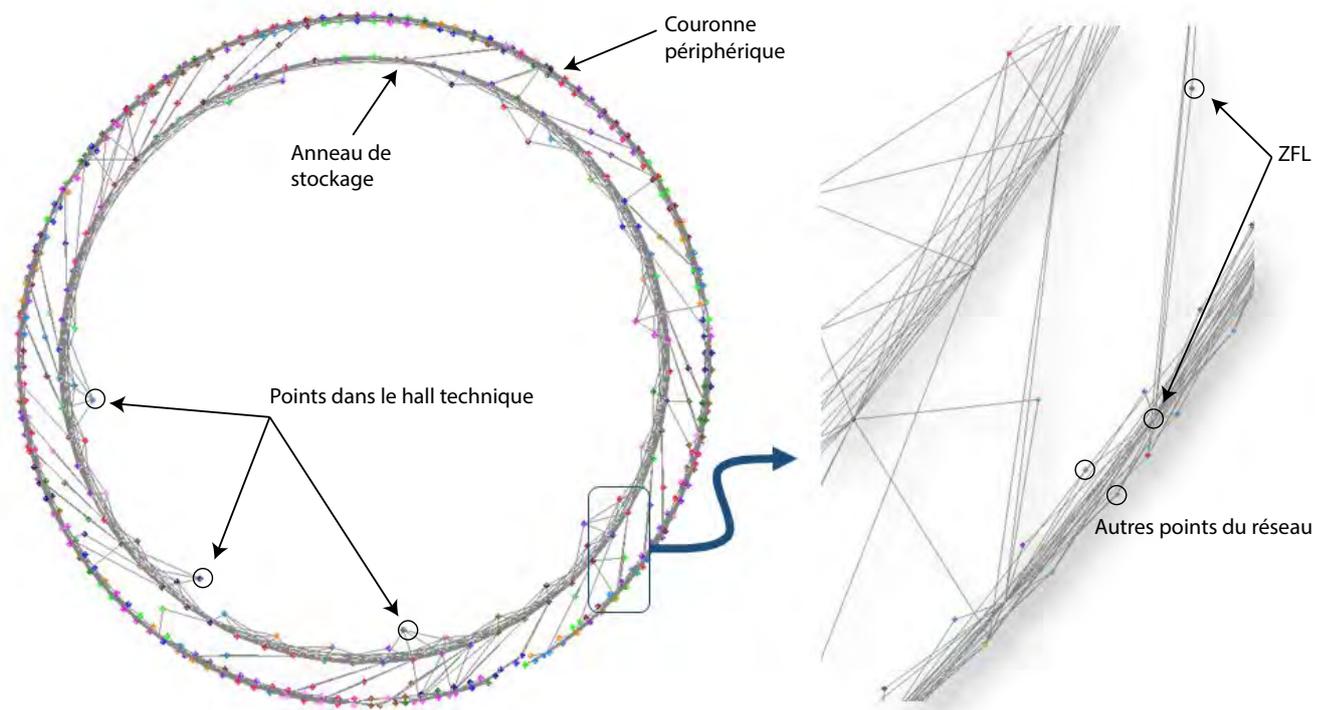


FIGURE 8 – Mesures réalisées dans le hall expérimental et pour le rattachement

La détermination des coordonnées des points des différents réseaux de référence est ainsi faite à l'aide du rattachement. Le plan moyen des quadrupôles servant de référence permet de déterminer les points constitués des potences et des supports magnétiques, qui serviront ensuite de référence pour les points des différents réseaux de référence situés dans le hall expérimental.

Sur la *Figure 8*, il est possible d'observer les différents éléments des campagnes de nivellement exceptés les mesures prises à l'intérieur de l'anneau de stockage :

- les points matérialisés par des supports magnétiques utilisés pour le rattachement lors des "grands Shutdowns" sont situés le plus proche du centre du cercle composé par l'anneau de stockage,
- les stations du toit de l'anneau de stockage sont représentées par le cercle interne,
- les principaux points du hall expérimental sont représentés par le cercle externe,
- les visées reliant les deux cercles sont les lignes de lumière représentées par les ZFL.

### 1.2.3 L'utilisation du nivellement hydrostatique

L'ESRF est doté du système de nivellement hydrostatique pour observer les variations d'altitude notamment au niveau des poutres situées dans l'anneau de stockage mais aussi à plus petite échelle sur des dalles par exemple.

#### Description Générale

Le nivellement hydrostatique, autrement dit Hydrostatic Levelling System HLS, est un système permettant la mesure altimétrique de haute précision de manière continue. Utilisé sous forme de réseau et basé sur le principe des vases communicants, ce système est composé de pots HLS montés en série et reliés entre eux par une durite d'eau et une durite d'air. Plusieurs capteurs connectés à un même réseau hydrostatique permettent de déduire les dénivelées entre chacun d'entre eux.

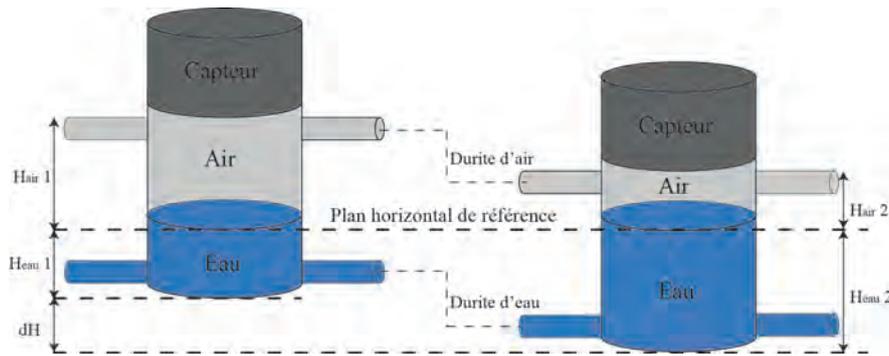


FIGURE 9 – Principe de fonctionnement des capteurs HLS

De par une installation plane de l’anneau de stockage, le système est ainsi régi par un équilibre hydrostatique, ce qui signifie que la surface de l’eau est prise comme plan horizontal de référence. Cette référence n’est soumise qu’à la gravité et est donc indépendante des mouvements du pot liés à son environnement.

La configuration du système peut donc être décrite par l’équation suivante :

$$H_{eau1} + H_{air1} = H_{eau2} + H_{air2}$$

avec :

$H_{eau}$  la hauteur d’eau dans le pot,

$H_{air}$  la hauteur d’air dans le pot.

Chaque pot, composé d’acier inoxydable amagnétique, réalise des mesures de distance à l’aide d’un capteur capacitif constitué de deux électrodes :

- le capteur central,
- la surface de l’eau.

Ainsi la variation d’altitude se déduit de la variation de hauteur du liquide présent dans le pot, mesurée à l’aide de ce capteur de déplacement réalisant des mesures sans contact.

Les pots HLS sont également équipés de sondes de température afin de connaître à chaque instant ce paramètre car toute variation peut entraîner des modifications des lectures du capteur capacitif dues au phénomène de dilatation de l’eau ou encore éventuellement la dilatation du pot.

Ainsi, le nivellement hydrostatique est un système possédant une précision annoncée de l’ordre de quelques micromètres.

Ce procédé permet non seulement de travailler en temps réel mais aussi d’être totalement autonome, sans présence humaine, lui autorisant à être dans des zones à risque telles que l’intérieur de l’anneau de stockage présentant des radiations. Cependant, pour son bon fonctionnement, il ne faut pas qu’il y ait des bulles d’air dans le circuit d’eau car cela perturbe la communication entre les différents pots.

Suite au mouvement des pots et l’évolution du réseau, caractérisée par la présence de bulles, de légères fuites ou encore l’évaporation de l’eau, l’altitude du plan de référence évolue dans le temps.

### Principe de fonctionnement du capteur

Au niveau du capteur, la mesure de capacité s’effectue électroniquement par le biais de la mesure d’un signal analogique, une tension ( $\pm 10V$ ). Cette tension est ensuite transformée en distance à l’aide d’un polynôme de transformation dont le degré est suivant le type de capteur. La formule générale est la suivante :

$$H_{air} = a + bV + cV^2 + dV^3 + eV^4$$

avec :

$H_{air}$  la distance entre le capteur et la surface de l'eau,

$V$  la mesure capacitive exprimée en volts,

$a, b, (c, d, e)$  les paramètres déterminés lors de l'étalonnage de chaque pot HLS.

Ainsi, les mesures que l'on obtient ne sont pas totalement brutes mais ont subi au préalable une transformation polynomiale.

L'étude absolue des lectures est en théorie impossible de par des observations qui sont principalement des décalages entre deux instants distincts. Comme le signale très justement Julien BOEREZ dans son TFE [4] : "Si une dénivelée entre deux pots est la même en  $t$  et  $t+1$ , cela ne signifie pas que les deux pots n'ont pas bougé, cela veut simplement dire que les deux pots ont subi le même déplacement."

Plusieurs types de capteurs sont présents au sein de l'ESRF, leur nom étant attribué suivant leur évolution. Tous les capteurs ont été fabriqués par l'entreprise Fogale Nanotech avec une précision de lecture de  $2 \mu\text{m}$ . Un premier réseau de capteurs HLS a été installé dans l'anneau de stockage constituant les capteurs de première génération. Puis quelques temps après, le besoin s'est fait ressentir d'installer un deuxième réseau de capteurs HLS présentant un système électronique différent sur le toit afin de surveiller les mouvements verticaux du site.

Cependant, une dérive dans le temps des capteurs HLS de première génération a été constatée. Le caractère aléatoire de la dérive du système étudié par Julien BOEREZ [4] a entraîné le remplacement de ces capteurs HLS par une nouvelle génération de capteur HLS présentant également un électronique différent. Ainsi l'ESRF utilise à présent des capteurs HLS dits de deuxième et troisième générations sur le toit et dans l'anneau de stockage.

### Les capteurs de deuxième génération

Il y a donc 32 capteurs HLS de deuxième génération sur le toit. Deux capteurs supplémentaires sont intégrés au réseau de pots HLS présent dans l'anneau de stockage mais ils sont situés à l'extérieur, permettant ainsi le lien entre l'intérieur et l'extérieur de l'anneau de stockage. De plus, l'extrémité supérieure du capteur forme une coupelle afin d'y accueillir une boule Taylor Hobson de 88,9 mm de diamètre, ce qui permet d'intégrer directement les pots dans un réseau de nivellement.



FIGURE 10 – Pot HLS de deuxième génération [4]



FIGURE 11 – Éléments d'un pot HLS [4]

Leur plage de lecture est de 2,5 mm au total dans l'intervalle  $[0V; 10V]$  présentée de la manière suivante :

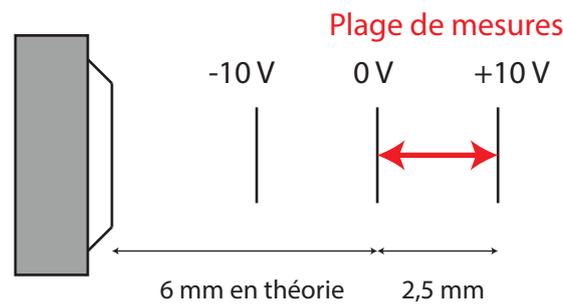


FIGURE 12 – Plage de mesures des capteurs de deuxième génération

Sur la *Figure 12*, le capteur est représenté de côté.

Nous pouvons constater que la lecture du capteur ne commence qu'à partir d'une certaine distance de la surface du capteur. Cela permet d'éviter que la surface d'eau rentre en contact avec la surface du capteur ce qui le ferait disjoncter. Cette distance est propre à chaque capteur et est environ égale à 6 mm.

Le polynôme de transformation de 2<sup>ème</sup> degré permettant de passer de la tension à la distance utilisée des coefficients moyennés définis il y a plusieurs années.

### Les capteurs de troisième génération

La troisième génération du système se constitue de 288 capteurs Fogale Nanotech installés dans l'anneau de stockage par groupe de trois sur les différentes poutres comportant les aimants de focalisation.

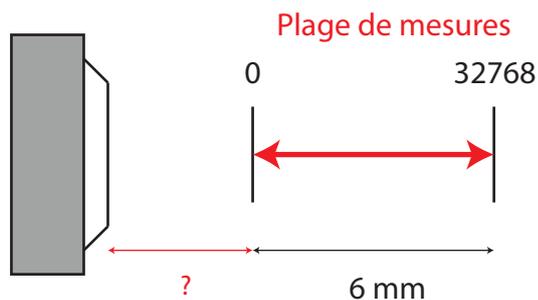


FIGURE 13 – Plage de mesures



FIGURE 14 – Pot HLS de troisième génération [4]

Concernant leur plage de mesures, ils disposent d'une plage de 6 mm. Le capteur transforme directement la tension observée en une valeur numérique comprise entre 0 et  $2^{15}$ . Cette valeur numérique permet de limiter la perte de données lors du transfert de l'observation. Ensuite est appliqué le polynôme de transformation de 4<sup>ème</sup> degré en utilisant pour chaque capteur les coefficients associés issus de la calibration.

La distance du zéro de lecture des capteurs n'est pas connue suite à une utilisation standard qui n'est pas en absolue mais en relatif.

## 2 Détermination du transfert des hauteurs de l'anneau de stockage aux lignes de lumière

### 2.1 Description de la méthode

#### 2.1.1 Introduction

La localisation du site entraîne des mouvements de terrain non négligeables. Ces mouvements ont une forte composante systématique suite aux observations réalisées depuis plusieurs années, mais ils restent néanmoins difficiles à prédire avec précision. De ce fait, la détermination des coordonnées des points du réseau de référence, issue des campagnes de nivellement réalisées lors des différents Shutdowns, ne suffit plus. Afin d'avoir un réseau de points de nivellement au niveau du sol du hall expérimental (ZFL) correspondant le plus possible à la réalité terrain, il a été demandé d'effectuer une étude sur la possibilité d'obtenir des résultats en temps réel.

De par la non-nécessité d'une présence humaine pour son fonctionnement, le système de nivellement hydrostatique installé au sein de l'anneau de stockage semble être adapté au problème. Ce système non conventionnel permettrait de s'affranchir de l'obligation de rentrer dans l'anneau de stockage. Ainsi la méthode envisagée est un transfert de hauteur en utilisant le système de nivellement hydrostatique déjà en place au sein du site.

À l'ESRF, le faisceau d'électrons est l'unique référence pour la composante verticale. Cependant, la position exacte du faisceau d'électrons au sein de l'anneau de stockage n'est pas connue, mais varie peu. De ce fait, il a été décidé de considérer la distance verticale entre le faisceau d'électrons et les Survey Monuments comme fixe et valant 450 mm. Ainsi dans notre démarche, les Survey Monuments calculés lors des campagnes de nivellement seront pris comme référence.

Les Survey Monuments, comme l'illustre la *Figure 15*, sont des repères fixés sur les quadripôles et sextupôles matérialisant un point précis. Ce sont des pièces dont la forme permet de réaliser un centrage forcé en y installant une sphère Taylor, un prisme ou encore une embase d'instrument.

L'étiquette présente sous le Survey Monument indique le nom du point. Chaque point est ainsi nommé selon une nomenclature spécifique.



FIGURE 15 – Photo d'un SM présent dans la cellule 1 du SR

La méthode alternative est ainsi basée sur un transfert de hauteurs. Cela consiste en la somme de hauteurs mesurées préalablement par différentes techniques possibles. La hauteur finale représente la hauteur entre les Survey Monuments et le point ZFL au sol considéré, représentée par la flèche rouge sur le graphique suivant. La *Figure 16* ci-après permet d'avoir un aperçu en 3D du cheminement envisagé pour le transfert des hauteurs, représenté en vert en suivant la numérotation indiquée.

## 2.1.2 Principe général

L'idée générale est de déterminer la hauteur entre l'anneau de stockage et les points ZFL des lignes de lumière en utilisant le système HLS. La *Figure 16* ci-dessous explique la méthode de détermination des hauteurs à partir des Survey Monuments situés dans l'anneau de stockage pour les deux points ZFL d'une ligne de lumière donnée :

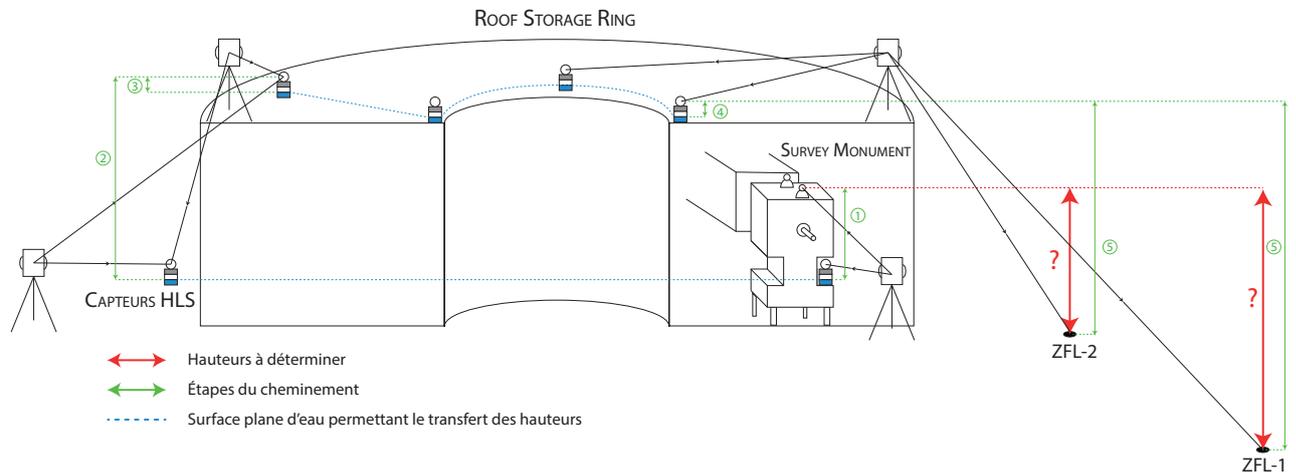


FIGURE 16 – Schéma général

Sur la *Figure 16* il est possible d'observer l'intérieur de l'anneau de stockage contenant les poutres. Celles-ci soutiennent des quadripôles et sextupôles sur lesquels sont disposés des Survey Monuments. Des pots HLS sont également vissés sur les poutres au nombre de 3 par poutre. Ainsi deux réseaux de capteurs HLS sont présents : l'un étant dans l'anneau de stockage fixé sur les poutres et l'autre sur le toit de l'anneau de stockage. Les réseaux de pots HLS, de par l'utilisation d'une surface plane d'eau comme référence, permettent de transférer à n'importe quel endroit du réseau des hauteurs. Ainsi l'idée est de relier les deux réseaux distincts afin de pouvoir atteindre n'importe quel point ZFL situé dans le hall expérimental à partir du toit.

Comme illustré par la *Figure 16*, le transfert se fait en plusieurs étapes :

- la hauteur entre les Survey Monuments connus en altitude, et la surface d'eau, référence pour le réseau de capteurs HLS présent dans l'anneau de stockage,
- la hauteur entre le capteur HLS issu du réseau de l'anneau de stockage et celui issu du réseau du toit,
- la hauteur entre le centre du prisme installé sur le capteur HLS du toit servant pour le transfert entre les deux réseaux de pots HLS et la surface d'eau, référence pour le réseau de capteurs HLS présent sur le toit,
- la hauteur entre la surface d'eau associée au réseau de capteurs HLS du toit et le centre du prisme installé sur le pot HLS utilisé comme lien avec les points ZFL,
- la hauteur entre le capteur HLS issu du réseau du toit et le point ZFL souhaité et situé dans le hall expérimental.

Pour ce faire, plusieurs types de mesures sont utilisés :

- les mesures effectuées à l'aide d'un appareil Leica AT401 Laser Tracker,
- les mesures effectuées à l'aide d'un trusquin,
- les lectures des capteurs HLS.

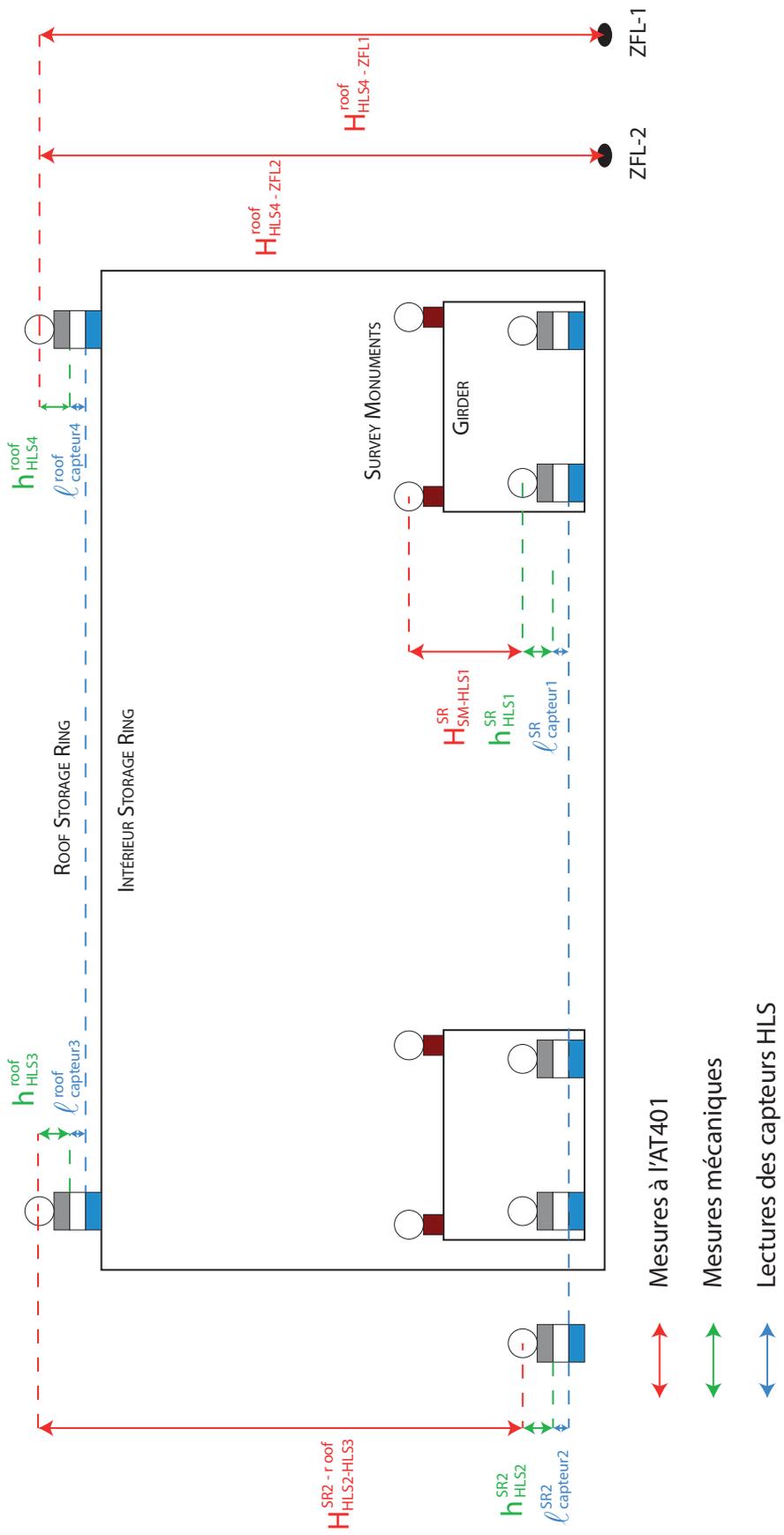


FIGURE 17 – Lien entre les hauteurs mesurées et l'équation générale

L'équation générale relative à la détermination de la hauteur entre les Survey Monuments et un point ZFL donné est la suivante :

$$dH_{SM-ZFL} = -H_{SM-HLS1}^{SR} - h_{HLS1}^{SR} - l_{capteur1}^{SR} + l_{capteur2}^{SR2} + h_{HLS2}^{SR2} + H_{HLS2-HLS3}^{SR2-roof} \\ - h_{HLS3}^{roof} - l_{capteur3}^{roof} + l_{capteur4}^{roof} + h_{HLS4}^{roof} - H_{HLS4-ZFL}^{roof}$$

sous la forme  $X_b^a$  avec :

- X le type de mesure effectué,
  - $H$  dénivelée prise à l'AT401,
  - $h$  hauteur prise au trusquin,
  - $l$  lecture HLS.
- a le lieu de la station/mesure,
- b l'élément mesuré.

La *Figure 17* ci-avant permet de faire le lien entre l'équation et les mesures effectuées sur le terrain.

### 2.1.3 Principe détaillé

Ainsi le cheminement du transfert des hauteurs peut se découper en plusieurs étapes distinctes en alternant des transferts verticaux et des transferts horizontaux.

#### Les mesures faites à l'intérieur de l'anneau de stockage

Les Survey Monuments étant pris comme point de départ, il faut dans un premier temps déterminer la hauteur entre les Survey Monuments et la surface d'eau servant de référence pour le système HLS.



FIGURE 18 – Pot HLS présent dans le SR



FIGURE 19 – Station visant SM et HLS d'une même poutre

Tout d'abord, des mesures à l'AT401 sont effectuées afin de relier les Survey Monuments, connus en coordonnées suite aux campagnes de nivellement, aux pots HLS situés sur une même poutre, représentant  $H_{SM-HLS1}^{SR}$  dans l'équation générale. Sur la *Figure 19* nous pouvons observer comment est prise cette mesure. Deux visées sont alors effectuées, l'une sur le prisme au niveau du Survey Monument et l'autre sur le prisme posé sur le capteur HLS situé à la verticale. Une étude sera réalisée afin d'observer la caractéristique constante ou non de cette mesure dans le temps.

Cinq poutres approximativement bien réparties ont été choisies, chacune comportant 2 Survey Monuments : C01G10, C7G10, C12G10, C20G10 et C26G10. Cela fait donc un total de 10 hauteurs à déterminer entre les Survey Monuments et la référence plane de l'eau.

Concernant les pots HLS contenus dans l'anneau de stockage, leur surface extérieure supérieure n'est pas adaptée au support de prismes contrairement à ceux sur le toit. La surface n'étant pas forcément lisse non plus, il a été décidé de coller un support de prisme aimanté, préalablement usiné pour qu'il puisse tenir dans les protections en plomb entourant le capteur HLS, le protégeant des radiations lors du fonctionnement de la machine. La mise en place de ce support, illustré sur la *Figure 18*, permet également de viser toujours de la même manière.

Ensuite la hauteur entre le prisme sur le capteur et la surface représentant l'électrode du capteur a pu être mesurée au moyen d'un trusquin  $h_{HLS1}^{SR}$ . Cette hauteur peut être considérée comme constante dans le temps de par la stabilité du matériau composant les pots HLS, à savoir de l'acier inoxydable amagnétique.

Enfin, s'ajoute à cela la lecture même du capteur  $l_{capteur1}^{SR}$  représentant une distance entre l'électrode du capteur et la surface d'eau de référence.

Ainsi nous obtenons :

$$dH_{SM-eau}^{SR} = -H_{SM-HLS1}^{SR} - h_{HLS1}^{SR} - l_{capteur1}^{SR}$$

Ces mesures ne peuvent être faites qu'en période de Shutdowns. Une étude sera donc réalisée par la suite pour savoir si l'on peut considérer cette mesure comme constante dans le temps, ce qui permettrait, une fois déterminée, de ne plus avoir besoin de retourner dans l'anneau de stockage. L'idéal serait de contrôler ces mesures à une fréquence très faible. Cette hypothèse est envisageable car les poutres sont considérées comme indéformables. Le seul problème potentiel serait les inclinaisons longitudinales et transversales de la poutre mais qui sont considérées négligeables.

### **Le transfert de hauteur à l'aide du système HLS au sein de l'anneau de stockage**

La hauteur obtenue à l'étape précédente se transfère d'elle-même vers tous les HLS de l'anneau de stockage ainsi qu'aux deux HLS sur le même réseau mais situés en dehors de l'anneau, en BM07 et BM19 uniquement, grâce au plan d'eau de référence.

### **Le transfert de hauteur entre l'anneau de stockage et le toit**

Arrivé aux capteurs HLS à l'extérieur de l'anneau de stockage, il est possible de transférer la hauteur vers les capteurs HLS situés sur le toit. Après avoir pris en compte la lecture du capteur HLS issu du réseau de l'anneau de stockage  $l_{capteur2}^{SR2}$  et la mesure effectuée au trusquin  $h_{HLS2}^{SR2}$  ainsi que celles respectivement issues du capteur HLS situé sur le toit,  $l_{capteur3}^{roof}$  et  $h_{HLS3}^{roof}$ , la mesure de hauteur entre le HLS au niveau du sol de l'anneau de stockage et le HLS situé sur le toit de ce dernier peut se faire à l'aide de l'AT401  $H_{HLS2-HLS3}^{SR2-roof}$  en utilisant la méthode de nivellement indirect.

Cette manipulation, réalisée de deux stations différentes l'une dans le hall expérimental et l'autre sur un tripode installé sur le toit servant de contrôle, peut être effectuée en BM07 et en BM19. La grandeur  $H_{HLS2-HLS3}^{SR2-roof}$  représente la hauteur calculée issue de ces deux stations.

Nous obtenons ainsi le calcul suivant pour cette partie :

$$dH^{SR-roof} = l_{capteur2}^{SR2} + h_{HLS2}^{SR2} + H_{HLS2-HLS3}^{SR2-roof} - h_{HLS3}^{roof} - l_{capteur3}^{roof}$$

De la même manière que pour les hauteurs mesurées dans l'anneau de stockage, il serait opportun de s'intéresser à la possibilité de considérer ces valeurs comme constantes.

## Le transfert de hauteur à l'aide du système HLS sur le toit

Comme précédemment la hauteur obtenue se transfère d'elle-même vers tous les pots HLS présents sur le toit de l'anneau de stockage.

## Le transfert de hauteur entre les pots HLS sur le toit et les points ZFL dans le hall expérimental au niveau des lignes de lumière

La redescente de la hauteur vers les lignes de lumière se réalise en faisant des visées sur plusieurs pots HLS sur le toit à des distances raisonnables et sur les deux points ZFL visibles au niveau du hall expérimental. Ainsi il faut tenir compte de la lecture du capteur HLS présent sur le toit  $l_{\text{capteur4}}^{\text{roof}}$ , la hauteur du capteur elle-même  $h_{\text{HLS4}}^{\text{roof}}$  et la hauteur déduite des visées faites à l'AT401  $H_{\text{HLS4-ZFL}}^{\text{roof}}$ . Ainsi nous obtenons :

$$dH_{\text{HLS-ZFL}}^{\text{roof}} = l_{\text{capteur4}}^{\text{roof}} + h_{\text{HLS4}}^{\text{roof}} - H_{\text{HLS4-ZFL}}^{\text{roof}}$$

Plusieurs lignes de lumière différentes ont été choisies pour valider la méthode. Les cinq lignes de lumière suivantes ont été sélectionnées afin d'avoir une répartition équitable autour de l'anneau de stockage :

BM01, BM08, BM14, BM19 et BM29.

Pour le transfert des pots HLS du toit du tunnel aux repères ZFL au sol du hall expérimental, deux méthodes ont été envisagées. La première méthode, *Figure 20*, consiste en l'utilisation d'une unique station posée sur un tripode dont les visées seront composées de deux pots HLS visibles sur le toit ainsi que les deux points ZFL du hall expérimental visibles de cette même station. La deuxième méthode, *Figure 21*, se compose elle de deux stations, la première sur le toit reliant les pots HLS du toit au point matérialisé par le tripode et la deuxième au niveau du hall expérimental reliant les deux points ZFL au tripode.

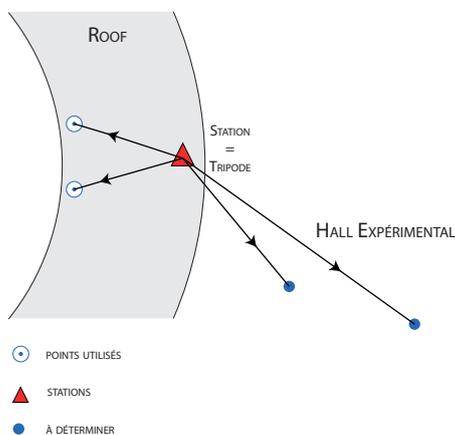


FIGURE 20 – Méthode 1

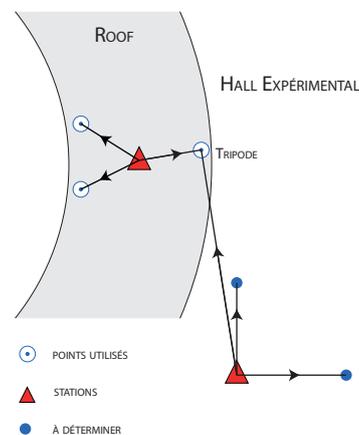


FIGURE 21 – Méthode 2

Le choix s'est porté sur la première méthode qui s'avère plus adaptée car la mise en œuvre sur le terrain est plus simple à effectuer.

Pour conclure, la *Figure 22* représente la vue du dessus des différents points qui seront mesurés et utilisés pour étudier cette nouvelle méthode permettant la détermination des points ZFL souhaités en temps réel.

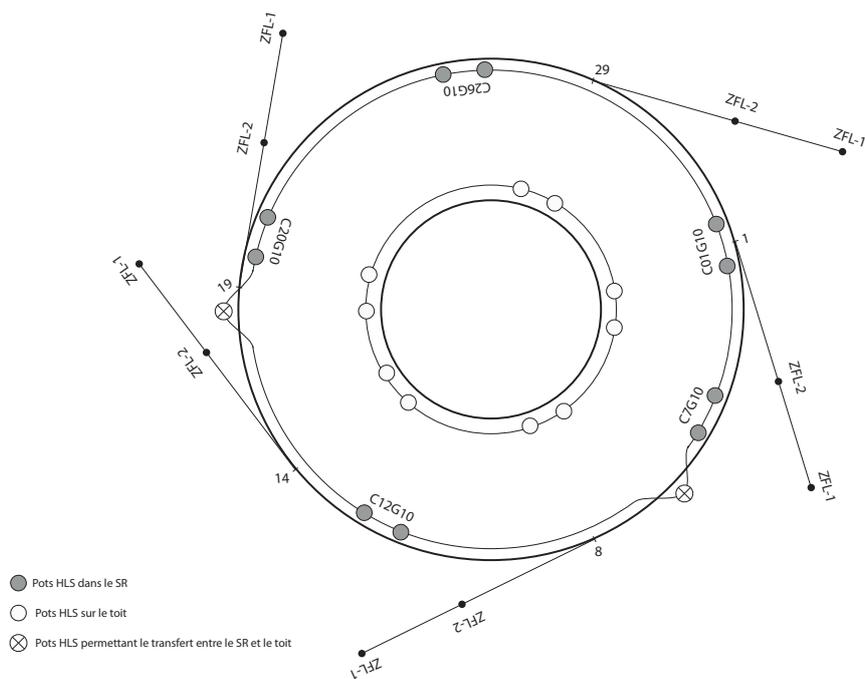


FIGURE 22 – Schéma vue du dessus

Nous pouvons observer les pots HLS situés à l'intérieur de l'anneau de stockage servant de lien entre les Survey Monuments et l'extérieur de l'anneau de stockage. Deux pots HLS issus du réseau hydrostatique de l'anneau de stockage sont installés dans le hall expérimental, autrement dit à l'extérieur de l'anneau de stockage. Ces derniers permettent de relier le réseau de pots HLS dont ils font partie à celui présent sur le toit de l'anneau de stockage. Le réseau présent sur le toit a été installé sur sa bordure intérieure. Nous pouvons également observer les lignes de lumière tangentes à l'anneau de stockage qui ont été choisies pour valider la méthode.

Les pots HLS dans l'anneau de stockage et les points ZFL ont donc été choisis afin d'être le plus équitablement répartis tout au long de l'anneau.

## 2.2 Choix du matériel et prise de mesures

L'AT401 est l'appareil privilégié pour cette tâche car il permet de mesurer des dénivelées importantes sur de courtes distances de visées en ayant une précision appropriée avec une mesure de distance absolue de  $\pm 5 \mu m$  et une mesure angulaire absolue de  $\pm 7,5 \mu m + 3 \mu m/m$ . De plus, il présente l'avantage d'avoir une portabilité relativement aisée, contrairement par exemple à l'AT901 qui est beaucoup plus volumineux.

Avant chaque Shutdown, les appareils utilisés sont calibrés. Cependant, il a été constaté la présence d'une collimation résiduelle. Cette constante, propre à chaque appareil est alors déterminée à partir des mesures prises lors du Shutdown.

Une étude relative à l'erreur des différents AT401 présents à l'ESRF a donc été réalisée par Monsieur Gilles GATTA. Les mesures effectuées lors du Shutdown du mois de mars 2015 ont été utilisées pour réaliser cette étude. Ces erreurs obtenues sont également comparées à la courbe de correction du niveau apparent, qui prend en compte non seulement l'erreur sphérique terrestre mais aussi l'erreur due à la réfraction atmosphérique.

L'erreur que nous pouvons observer sur la *Figure 23* résulte de la différence entre l'écart à la moyenne des lectures et l'écart à la moyenne de la coordonnée z du même point, obtenu par traitement des mesures à l'aide du logiciel GCP, pour une distance du point visé donnée.

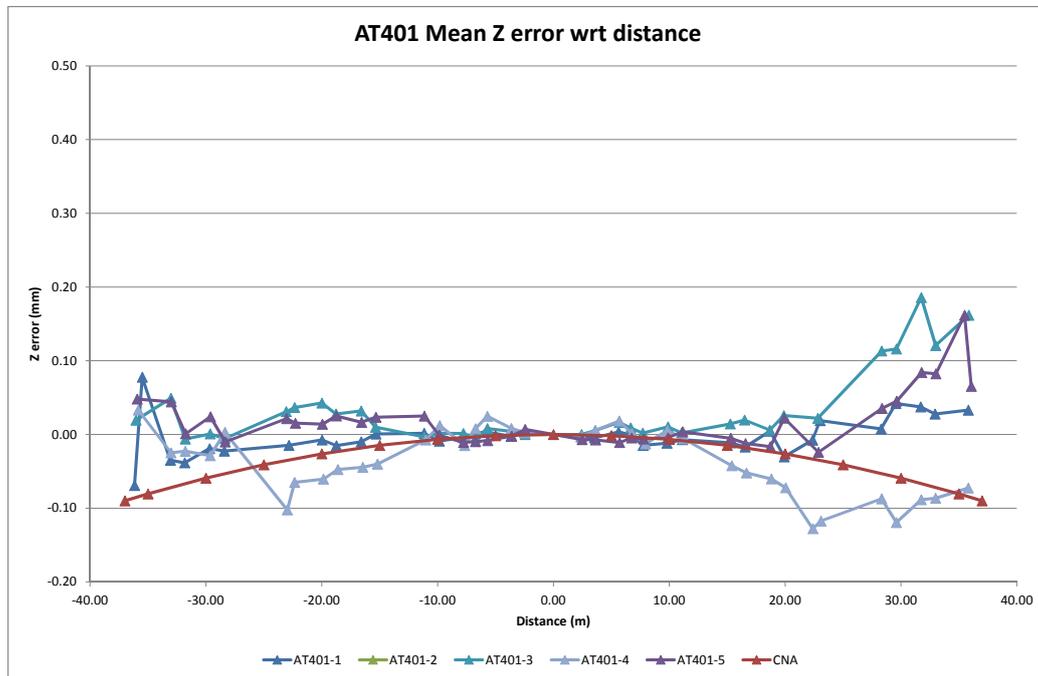


FIGURE 23 – Erreurs des AT401 selon la distance en comparaison avec la CNA

Grâce à la *Figure 23* nous pouvons constater que le comportement de l'erreur d'un AT401 évolue selon la distance de visée. Pour des visées inférieures à 15 m, peu importe l'appareil utilisé, l'erreur est inférieure à 0,03 mm donc la correction du niveau apparent est négligeable. Cela explique pourquoi lors des campagnes de nivellement cette correction est négligée lors du traitement des mesures prises dans l'anneau de stockage du fait des faibles distances de visées. Cependant les mesures lointaines semblent être impactées par la sphéricité terrestre et la réfraction atmosphérique.

Suite aux résultats obtenus il a été décidé d'utiliser l'appareil AT401-4 car c'est celui dont le comportement est le plus proche par rapport à la correction du niveau apparent. Et lors du traitement des mesures qui seront effectuées, au vu des distances de visées pouvant atteindre jusqu'à 50 m, les dénivelées obtenues seront corrigées de la courbure terrestre.

Les prises de mesures avec l'AT401-4 seront effectuées à l'aide du logiciel de New River Kinematics [5] nommé Spatial Analyser. Un prisme de type "Red Ring Reflector" d'un diamètre de 38,1 mm sera utilisé. La prise de mesures s'effectuera en mode standard qui correspond à un mode de mesure de 2 secondes par point dans un environnement stable.

Lors de la prise de mesures, il faut s'assurer de pouvoir prendre toutes les mesures nécessaires de tout type dans un même laps de temps. Cela signifie qu'avant d'aller faire des visées avec le Laser Tracker, il faut vérifier que les différents systèmes HLS fonctionnent correctement, en particulier les capteurs indispensables au cheminement envisagé.

### 2.3 Traitement des mesures

Afin de procéder à l'ajustement des observations effectuées, de nombreuses méthodes existent. La méthode des moindres carrés en est une et est de très loin la plus utilisée.

L'utilisation de moindres carrés implicites serait adaptée à notre système de par le fait de tenir compte directement des précisions des observations d'angle et de distance pour les mesures réalisées à l'aide de l'AT401. Cependant, nous opterons pour la méthode des moindres carrés classique afin de pouvoir utiliser le logiciel spécifique à l'ESRF servant pour tous les calculs d'ajustement de réseau, le logiciel Global Compensation Program GCP[6]. Des dénivelées indirectes seront alors calculées dont la précision associée est issue d'une modélisation d'erreur, la propagation des erreurs, tenant compte des précisions des mesures angulaires et de distances.

Ainsi le calcul de moindres carrés sera effectué à l'aide du logiciel GCP qui a été développé par Messieurs David MARTIN et Gilles GATTA au sein de l'ESRF et est programmé en langage Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW). Il permet notamment de contrôler les mesures topographiques et détecter les erreurs avant d'effectuer la compensation du réseau.

Certaines précisions dépendant de la distance de visée, il est alors nécessaire de décortiquer davantage l'équation associée à la détermination d'un point ZFL, en faisant intervenir directement les différentes stations utilisées. De ce fait, il y a deux équations possibles suivant l'emplacement de la station pour le transfert entre le capteur HLS à l'extérieur de l'anneau de stockage rattaché à ceux situés à l'intérieur et celui sur le toit. Pour effectuer un contrôle au niveau de cette hauteur, il y a donc une station sur le tripode et l'autre au niveau du hall expérimental.

L'équation associée à la station effectuée sur le tripode est la suivante :

$$dH_{SM-ZFL} = -H_{SM-station1}^{SR} - H_{station1-HLS1}^{SR} - h_{HLS1}^{SR} - l_{capteur1}^{SR} + l_{capteur2}^{SR2} + h_{HLS2}^{SR2} + H_{HLS2-station2}^{roof} - H_{station2-HLS3}^{roof} - h_{HLS3}^{roof} - l_{capteur3}^{roof} + l_{capteur4}^{roof} + h_{HLS4}^{roof} + H_{HLS4-station3}^{roof} - H_{station3-ZFL}^{roof}$$

Et l'équation associée à la station effectuée depuis le hall expérimental est :

$$dH_{SM-ZFL} = -H_{SM-station1}^{SR} - H_{station1-HLS1}^{SR} - h_{HLS1}^{SR} - l_{capteur1}^{SR} + l_{capteur2}^{SR2} + h_{HLS2}^{SR2} + H_{HLS2-station2}^{SR2} + H_{station2-HLS3}^{SR2-roof} - h_{HLS3}^{roof} - l_{capteur3}^{roof} + l_{capteur4}^{roof} + h_{HLS4}^{roof} + H_{HLS4-station3}^{roof} - H_{station3-ZFL}^{roof}$$

Pour effectuer l'ajustement du réseau de points considéré, nous pouvons apparenter le réseau à un réseau de nivellement dont seuls les points connus et fixés en altitude sont les Survey Monuments déterminés lors des campagnes de nivellement. Ainsi nous pouvons parler de cheminement entre les Survey Monuments et les points ZFL à déterminer. Les différents cheminements possibles peuvent être sectionnés en plusieurs parties, comme indiqué dans les équations globales. Ces parties feront chacune l'objet d'une équation d'observation type, de la forme :

$$h = H2 - H1$$

- h la hauteur entre les deux points en mètre,
- H2 l'altitude du point haut en mètre,
- H1 l'altitude du point bas en mètre.

Tous les points intermédiaires ainsi que les points ZFL seront considérés comme des inconnues au problème. Cela fait donc un nombre d'inconnues de 95 pour 188 mesures au total.

En analysant la situation, le problème semble linéaire par rapport aux inconnues et observations dans l'équation d'observation type. De plus les mesures sont indépendantes les unes des autres donc la matrice des poids est diagonale. Ainsi le traitement par moindres carrés est facilité par ces deux aspects.

## 2.4 Analyse des résultats

Après avoir effectué toutes les mesures nécessaires, lors du Shutdown du mois de mars 2015, un premier traitement avec le logiciel GCP peut être réalisé. Nous verrons tout d'abord les corrections qui sont appliquées aux mesures, puis les précisions qui y seront associées et enfin les premiers résultats obtenus.

Concernant les mesures prises à l'AT401, les données brutes sont obtenues à l'aide du logiciel Spatial Analyser pour les mesures prises dans l'anneau de stockage et celles servant pour le transfert du hall expérimental vers le toit et à l'aide d'un exécutable pour le transfert des capteurs HLS sur le toit vers les points ZFL. Ces données brutes composées d'angles zénithaux et de distances sont transformées en hauteurs nécessaires au calcul. Pour en savoir plus sur les visées possibles et prises en compte dans les calculs suivants, il est possible de se reporter aux annexes.

La hauteur des capteurs HLS est mesurée à l'aide d'un trusquin. Cette détermination sera réalisée une seule fois car nous pouvons considérer les capteurs composés d'acier inoxydable comme indéformable puisqu'ils sont dans un environnement atmosphérique constant au cours du temps. Pour chaque capteur HLS, les lectures HLS enregistrées lors de la période de mesures complète seront moyennées car la moyenne est plus représentative de la réalité que les lectures à un instant donné  $t$ .

Enfin, les résultats obtenus pourront être comparés à ceux issus de la campagne de nivellement faite au même moment.

### 2.4.1 Les corrections à réaliser

Plusieurs corrections doivent être appliquées aux différentes hauteurs déterminées de par une utilisation spécifique et non standard des capteurs HLS ou encore de par la présence de visées à l'aide de l'AT401 pouvant atteindre 50 m.

#### Constante du zéro de lecture des capteurs HLS de troisième génération

Il a été constaté que la distance du zéro de lecture des capteurs de troisième génération présents au sein de l'anneau de stockage n'est pas connue. En effet, les lectures utilisées jusqu'à présent ne servaient qu'à donner la position relative de chaque capteur ou leur variation entre deux instants. Cependant, dans notre cas, seules des lectures absolues nous intéressent.

De ce fait, il sera nécessaire par la suite de déterminer cette constante pour chaque capteur utilisé et présent au sein de l'anneau de stockage. Pour le premier calcul une estimation de ce paramètre à **3,6 mm** semblerait adéquate.

Ainsi, cette valeur sera ajoutée à toutes les lectures des capteurs de l'anneau de stockage.

#### Correction de la courbure terrestre

De par la présence de visées lointaines pouvant aller jusqu'à 50 m pour la détermination des dénivelées indirectes, l'application de la correction de la courbure terrestre permettant de prendre en compte la non-planéité de la Terre est nécessaire.

De ce fait, il sera toujours ajouté aux mesures de dénivelées indirectes déduites des observations à l'AT401 une correction selon la distance horizontale de visée dont l'équation est la suivante :

$$corr = \frac{Dh^2}{2R_T}$$

avec

- *corr* la correction de la courbure terrestre (m),
- *Dh* la distance horizontale de la visée (m),
- *R<sub>T</sub>* le rayon de la Terre égal à 6 371 000 m (m).

### **Non-prise en compte de la réfraction atmosphérique correctement**

La correction de la réfraction atmosphérique est une correction importante pour les observations issues d'instruments optiques. L'indice de réfraction variant dans le milieu, la propagation du rayon n'est donc pas rectiligne. Cependant cette correction est adaptée pour des mesures prises en extérieur et non en intérieur.

Avec le laser tracker AT401 de Leica, la correction des observations se fait directement dans l'appareil à l'aide d'une sonde. Cependant, cette sonde ne peut se situer qu'aux alentours proches de la station. Ainsi, lorsque le milieu est homogène, la correction effectuée est correcte mais lorsque la visée se réalise dans un milieu hétérogène autrement dit les conditions atmosphériques varient le long du chemin optique, ce qui est le cas lorsque la station se situe sur un tripode sur le toit, alors la correction ne semble plus adaptée. Ainsi la correction de la réfraction est prise en compte mais pas correctement.

De ce fait, la magnitude d'erreur commise en ne tenant pas compte de cette correction correctement sera évaluée et intégrée dans le calcul d'incertitudes sous forme d'incertitude de la correction atmosphérique sur la distance ainsi que d'incertitude de la correction atmosphérique sur l'angle vertical.

### **2.4.2 La précision des appareils**

Lors des calculs des campagnes de nivellement, les précisions associées à chaque mesure sont de 0,03 mm, exceptées pour les points de rattachement qui sont associés à une précision plus élevée de 0,10 mm. Ces valeurs ont été déterminées avec l'expérience au sein de l'ESRF et ont été jugées comme les plus adaptées à la réalité.

Dans notre calcul, nous utiliserons les précisions issues des données constructeur.

#### **Le trusquin**

Pour les mesures de hauteur de la partie électronique des capteurs un trusquin est utilisé dont le modèle est HOLEX 44 3850 300. Les données du constructeur pour cet instrument sont les suivantes :

capacité de mesure	0-300 mm
précision instrument $\Delta t$	50 $\mu\text{m}$
résolution	10 $\mu\text{m}$

Ainsi le poids associé aux mesures réalisées à l'aide du trusquin sera de **50  $\mu\text{m}$** .

#### **Les capteurs HLS**

Tous les capteurs HLS qui sont présents au niveau de l'anneau de stockage ainsi que ceux positionnés sur le toit ont une précision dont la valeur est considérée à l'ESRF par expérience de **2  $\mu\text{m}$**  quelle que soit la génération utilisée.

Le passage d'un capteur HLS à un autre issu du même réseau aura une précision attribuée très faible de **1  $\mu\text{m}$** .

## Le Laser Tracker AT401 de Leica

Les données du constructeur utilisées sont issues du Manuel d'utilisation de l'AT401 Absolute Tracker de Leica Geosystems [7]. Les précisions y sont exprimées sous forme d'erreur maximale tolérée (Maximum Permissible Error MPE). Nous avons donc :

$$\begin{aligned} \text{mesure angulaire absolue (MPE)} & \quad \pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m/m} \\ \text{mesure de distance absolue (MPE)} & \quad \pm 10 \mu\text{m} \end{aligned}$$

*Automotive Society of Mechanical Engineers ASME* a défini MPE comme étant les valeurs extrêmes d'une erreur permise pour un instrument donné. Les résultats obtenus représentent habituellement la moitié de la valeur MPE. De ce fait nous prendrons :

$$\begin{aligned} \text{mesure angulaire absolue } \Delta A_v & \quad \pm 7,5 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m/m} \\ \text{mesure de distance absolue } \Delta D & \quad \pm 5 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Suite au choix de l'utilisation de la méthode de moindres carrés classique, les mesures d'angles verticaux et de distances prises par l'AT401 doivent être transformées en dénivelées indirectes afin d'être intégrées dans le calcul. Les stations étant réalisées majoritairement en visant un point plus bas que l'axe des tourillons de l'appareil, la formule pour le calcul des dénivelées indirectes  $h$  est la suivante :

$$h = D_p \sin \left( A_v - \frac{\pi}{2} \right)$$

avec

$h$  la dénivelée indirecte (m),

$D_p$  la distance pente issue des observations (m),

$A_v$  l'angle vertical issu des observations (rad).

Le calcul de la dénivelée indirecte faisant intervenir deux observations que sont l'angle vertical et la distance, la précision associée est alors issue d'une modélisation d'erreur appelée la propagation des erreurs. La précision s'exprime alors comme la somme quadratique des dérivées partielles par rapport à chaque variable multipliées par l'incertitude associée à cette variable :

$$\Delta h = \sqrt{\left( \frac{\partial h}{\partial D} \Delta D \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial A_v} \Delta A_v \right)^2}$$

Ce qui donne :

$$\Delta h = \sqrt{\left( \sin \left( A_v - \frac{\pi}{2} \right) \Delta D \right)^2 + \left( D \cos \left( A_v - \frac{\pi}{2} \right) \Delta A_v \right)^2}$$

La précision de l'appareil selon l'angle étant composée d'une constante  $a$  et d'une partie  $b$  dépendant de la distance, sous la forme  $\Delta A_v = \pm a \mu\text{m} + b \mu\text{m/m}$ , le calcul suivant a été effectué :

$$\Delta h = \sqrt{\left( \sin \left( A_v - \frac{\pi}{2} \right) \Delta D \right)^2 + \left( D \cos \left( A_v - \frac{\pi}{2} \right) b \right)^2 + a^2}$$

Ainsi est calculé le poids associé à chaque dénivelée indirecte intégrée dans le calcul de moindres carrés.

### 2.4.3 Les premiers résultats

Nous pouvons observer dans le tableau suivant les résultats issus du premier calcul en tenant compte des corrections et précisions énoncées précédemment. Nous avons donc l'altitude calculée pour chaque point ZFL que nous pouvons comparer aux résultats obtenus lors de la campagne de nivellement faite au même moment.

Nom du point	Altitude calculée (m)	Altitude campagne (m)	Écart des altitudes (m)
EXPH/A-ZFL/BM01-1	205,29811	205,29806	0,00005
EXPH/A-ZFL/BM01-2	205,31364	205,31352	0,00012
EXPH/A-ZFL/BM08-1	205,30708	205,30696	0,00012
EXPH/A-ZFL/BM08-2	205,32388	205,32370	0,00017
EXPH/A-ZFL/BM14-1	205,29289	205,29281	0,00008
EXPH/A-ZFL/BM14-2	205,30424	205,30418	0,00006
EXPH/A-ZFL/BM19-1	205,29647	205,29620	0,00026
EXPH/A-ZFL/BM19-2	205,31938	205,31922	0,00016
EXPH/A-ZFL/BM29-1	205,30466	205,30462	0,00005
EXPH/A-ZFL/BM29-2	205,31874	205,31852	0,00022

TABLE 1 – Résultats obtenus en tenant compte des différentes corrections et précisions à appliquer

Nous obtenons une **moyenne des écarts de 0,130 mm** et un **écart-type de 0,075 mm**, autrement dit des écarts généralement faibles.

Nom du point	Précision a posteriori (mm)	Précision a posteriori issue campagne (mm)	Écart-type total (mm)
EXPH/A-ZFL/BM01-1	0,11	0,11	0,15
EXPH/A-ZFL/BM01-2	0,06	0,12	0,13
EXPH/A-ZFL/BM08-1	0,11	0,09	0,14
EXPH/A-ZFL/BM08-2	0,06	0,10	0,12
EXPH/A-ZFL/BM14-1	0,11	0,09	0,14
EXPH/A-ZFL/BM14-2	0,07	0,09	0,12
EXPH/A-ZFL/BM19-1	0,06	0,10	0,12
EXPH/A-ZFL/BM19-2	0,05	0,10	0,11
EXPH/A-ZFL/BM29-1	0,11	0,11	0,15
EXPH/A-ZFL/BM29-2	0,06	0,12	0,13

TABLE 2 – Les précisions a posteriori obtenues pour chaque méthode

Il est intéressant de comparer l'écart-type des précisions issues des deux méthodes de détermination (Écart-type total) par rapport à l'écart-type des écarts entre les deux altitudes qui est de 0,130 mm. Nous pouvons donc observer une cohérence dans les résultats car l'écart-type des écarts est dans l'ordre de grandeur des écarts-types des précisions.

Cette cohérence peut s'expliquer par le fait qu'il n'y a qu'une seule semaine entre les mesures de l'anneau de stockage et celles de la couronne pour la campagne de nivellement lors du Shutdown du mois de mars, contrairement lors des "grands Shutdowns" où il peut s'écouler un mois entre les deux types de mesures.

Ainsi la détermination de l'altitude des points ZFL par cette nouvelle méthode basée sur le transfert est cohérente avec les résultats obtenus par les campagnes de nivellement.

#### 2.4.4 Conclusion

Les premiers résultats sont très positifs. Les deux méthodes utilisées pour la détermination des altitudes des points ZFL obtiennent des résultats très similaires. L'écart des altitudes entre les deux méthodes est toujours inférieur à 0,2 mm. Ce qui permet d'effectuer une validation de la méthode employée.

Cependant des améliorations peuvent être envisagées comme par exemple la détermination précise de la constante du zéro de lecture des capteurs HLS. Mais avant tout avec quelle incertitude les altitudes des points ZFL sont-elles déterminées ?

#### 2.5 Calcul d'incertitudes

En science expérimentale, il n'existe pas de mesure exacte. La mesure d'une grandeur s'accompagne toujours d'une estimation des incertitudes associées. L'estimation de l'erreur de mesure est aussi importante que la mesure elle-même car elle permet de valider la mesure avec un intervalle de confiance plus ou moins important.

Deux types d'évaluation de l'incertitude peuvent se faire :

- **Évaluation de type A** : évaluation de l'incertitude par une analyse statistique d'une série de mesures répétées en effectuant pour chaque répétition le protocole complet de la méthode de mesure,
- **Évaluation de type B** : les incertitudes dont la provenance est autre qu'une analyse statistique comme par exemple les données du constructeur ou encore le certificat d'étalonnage de l'appareil.

Nous allons voir par la suite les différents termes qui seront utilisés pour le calcul de l'incertitude globale.

##### 2.5.1 Évaluation de type A de l'incertitude

L'évaluation de type A de l'incertitude correspond à une analyse statistique consistant à la détermination d'un écart-type expérimental estimé à partir d'une répétabilité du protocole envisagé pour la prise de mesures. Le processus complet de la méthode de mesure est alors réalisé un certain nombre de fois préalablement défini.

Dans notre cas, de par un nombre important de mesures à prendre, nous n'effectuerons que 15 fois le processus complet. Le choix a été fait de se limiter à un seul cheminement, autrement dit les mesures uniquement d'une poutre de l'anneau de stockage (C07G10), d'un transfert entre l'anneau de stockage et le toit en D19 et d'une station sur tripode pour le lien entre les HLS du toit et le point ZFL associé dont la visée est la plus longue en BM19. Pour la prise de mesures, ce n'est pas le processus complet qui est effectué quinze fois à la suite mais chaque type de mesures pris séparément. En effet, cela prendrait trop de temps et nous observerions également l'évolution des mouvements de terrain, ce qui n'est pas notre objectif. Ainsi nous obtiendrons 15 déterminations différentes pour le point ZFL de la ligne de lumière concernée.

À l'aide des mesures prises lors du Shutdown du mois de juin 2015, un écart-type général issu des 15 déterminations en altitude d'un seul point ZFL a été déterminé, dont la valeur est :

**130  $\mu\text{m}$**

Ainsi nous obtenons l'évaluation de type A de l'incertitude qui sera prise en compte dans le calcul global de l'incertitude type.

## 2.5.2 Évaluation de type B de l'incertitude

### Incertitude pour les mesures prises au trusquin

Les données du constructeur pour cet instrument sont les suivantes :

capacité de mesure	0-300 mm
précision instrument $\Delta t$	50 $\mu\text{m}$
résolution	10 $\mu\text{m}$

Ce modèle étant à lecture digitale, l'incertitude de cet appareil  $u_t$  se calcule par la formule [8] :

$$u_t = \frac{\Delta t}{\sqrt{12}} = \frac{0,05}{\sqrt{12}} = 0,014 \text{ mm}$$

Ainsi l'incertitude associée aux mesures prises à l'aide du trusquin est de **14  $\mu\text{m}$** .

### Incertitude pour les lectures des capteurs HLS

Toutes les générations de capteurs HLS présents à l'ESRF ont une précision dont la valeur est considérée pour le groupe ALGE par expérience de 2  $\mu\text{m}$ .

Concernant l'étalonnage des capteurs, la valeur attribuée est issue de la moyenne des écarts-types des étalonnages de chaque capteur, deuxième et troisième générations confondues.

Nous prenons donc compte des valeurs suivantes :

précision des capteurs $u_c$	2 $\mu\text{m}$
étalonnage des capteurs $u_e$	0,042 $\mu\text{m}$

### Incertitude pour les mesures prises à l'AT401

Pour l'AT401, les incertitudes recensées qui seront prises en compte sont les suivantes :

- l'incertitude sur les dénivelées indirectes,
- les corrections atmosphériques sur la distance,
- les corrections atmosphériques sur l'angle vertical.

Actuellement la correction atmosphérique appliquée est celle directement issue d'une sonde intégrée à l'appareil. Étant donné que les mesures sont corrigées de la réfraction atmosphérique en utilisant uniquement les paramètres atmosphériques au niveau de la station, il est nécessaire de tenir compte de la magnitude d'erreur que l'on commet en ne prenant pas en compte cette correction des variations de conditions atmosphériques. C'est pourquoi il a été déterminé l'incertitude de la correction atmosphérique sur la distance ainsi que l'incertitude de la correction atmosphérique sur l'angle vertical.

### Incertitude associée aux dénivelées indirectes

Les données du constructeur pour cet appareil qui sont utilisées sont les suivantes :

mesure angulaire absolue $u_\beta$	$\pm 7,5 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m}/\text{m}$
mesure de distance absolue $u_d$	$\pm 5 \mu\text{m}$

La précision de l'appareil selon l'angle étant composée d'une constante  $a$  et d'une partie  $b$  dépendant de la distance, sous la forme  $\Delta A_v = \pm a \mu\text{m} + b \mu\text{m}/\text{m}$ , et comme nous l'avons vu précédemment, l'incertitude associée aux dénivelées indirectes peut se déterminer à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta h = \sqrt{\left(\sin\left(A_v - \frac{\pi}{2}\right) \Delta D\right)^2 + \left(D \cos\left(A_v - \frac{\pi}{2}\right) b\right)^2 + a^2}$$

De plus, l'AT401 étant un Laser Tracker, autrement dit un système laser permettant la prise de mesures, cela implique qu'il n'y a pas d'étalonnage à effectuer. Seule une calibration de l'appareil est effectuée avant chaque Shutdown afin de redéfinir les différentes constantes telles que l'erreur de collimation ou encore la constante d'addition.

### Incertitude de la correction atmosphérique sur la distance

La magnitude d'erreur que l'on commet lors de la non-prise en compte de la correction atmosphérique tout le long du trajet lumineux sur la distance peut s'apparenter à une erreur systématique qui influe sur la justesse des mesures. Pour déterminer cette magnitude d'erreur commise, une expérience a été réalisée.

Considérant que sur les trois paramètres des conditions atmosphériques, à savoir la pression, la température et l'humidité, la variation de température est celle de plus forte influence sur la correction atmosphérique des distances, il a été alors intéressant d'observer sa variation sur le chemin optique qu'emprunte le rayon lumineux sur les plus longues visées possibles. Ces visées s'effectuent lorsque la station est sur un tripode et qu'elle vise le point ZFL le plus éloigné. De plus, la hauteur entre la station et le point visé n'étant pas négligeable et d'environ 5 m, l'influence de la pression est à prendre en compte. Du fait de la présence d'un grillage empêchant l'accès au tripode via le hall expérimental, seules trois lignes de lumière sur les cinq sélectionnées ont pu être mesurées par la sonde de température et de pression en suivant approximativement le chemin optique du rayon lumineux : BM01, BM08 et BM19.

Les mesures à l'aide de la sonde ont été réalisées de la manière suivante :

- 10-15 minutes par point au niveau de la station et du point ZFL-1 de la ligne concernée,
- 2-3 minutes par point pour les points intermédiaires.

Les mesures ont été prises tous les 6 m environ en commençant par la station qui a été mesurée à l'aide d'une perche. Le tableau suivant recense les observations :

BM01 (°C)	BM01 (mBar)	BM08 (°C)	BM08 (mBar)	BM19 (°C)	BM19 (mBar)
22,2	992,6	23,6	992,6	24,6	992,5
22,1	992,7	23,6	992,7	24,5	992,6
22,1	992,7	23,5	992,7	24,3	992,7
22,0	992,9	23,4	992,8	24,1	992,7
21,9	992,9	23,2	992,8	24,0	992,8
21,9	993,0	23,2	992,9	23,8	992,8
21,8	993,0	22,6	992,9	23,6	992,8
21,8	993,0	22,4	992,9	23,3	992,9
21,5	993,0	22,3	993,0	23,2	992,9

TABLE 3 – Observations de la température et de la pression suivant le chemin optique en partant de la station

Il faut savoir que la variation de température dépend de plusieurs paramètres, notamment l'environnement comme l'emplacement des souffleries, des espaces vides ou non ou encore l'emplacement même du point, s'il est protégé ou non.

En étant restée plus de 10 minutes pour les points extrêmes du chemin optique, nous pouvons constater que les écarts entre la station et le point ZFL ne sont pas identiques d'une ligne à l'autre et il en est de même de la moyenne des températures, mais il semble faire toujours plus frais au point ZFL de la couronne extérieure qu'au niveau de la station placée sur le toit.

Concernant la pression, les observations effectuées sont cohérentes avec l'équation de la pression atmosphérique  $P$  (mBar) en fonction de l'altitude  $z$  (m) suivante :

$$P(z) = 1013,25 \left( 1 - \frac{0,0065z}{288,15} \right)^{5,255}$$

Nous obtenons bien une variation de pression atmosphérique de 0,5 mBar pour une variation d'altitude d'environ 5 m.

Une analyse statistique des observations a été réalisée :

	BM01	BM08	BM19
moyenne (°C)	21,9	23,1	23,9
écart station-moyenne (°C)	0,3	0,5	0,7
moyenne (mBar)	992,9	992,8	992,7
écart station-moyenne (mBar)	-0,3	-0,2	-0,2

TABLE 4 – Analyse statistique des observations

La moyenne des écarts entre la moyenne des températures et la température de la station étant de 0,5 °C et la moyenne des écarts entre la moyenne des pressions et la pression de la station étant de 0,2 mBar, il serait intéressant de convertir ces variations en hauteur afin de connaître l'erreur que l'on commet en altitude en ne corrigeant pas correctement des conditions atmosphériques réelles.

Pour cela, nous allons corriger les distances de toutes les lignes de lumière de 23 °C avec une pression de 992,9 mBar et 23,5 °C avec une pression de 992,7 mBar par exemple. Puis nous pourrions transformer ces distances en hauteurs et les comparer entre elles.

La correction de la distance s'effectue à l'aide de la correction de l'indice de réfraction d'après la formule de Barrel et Sears suivante du cours de ES2 [9] :

$$D_{corr} = D_{mes} \frac{10^6}{K1 + 10^6}$$

et

$$K1 = 0,38366072 \frac{P}{0,1333224} K2 - 649167 H K3$$

$$K2 = \frac{1 + \frac{P}{133322,4} (0,817 - 0,0133T)}{1 + 0,003661T}$$

$$K3 = (1,0006 + 2,33 \times 10^{-5} T + 3,02 \times 10^{-5} P) e^{-\frac{5320,966}{273,15+T}}$$

avec

- $P$  la pression (kPa),
- $T$  la température (°C),
- $H$  l'humidité relative (%).

Ainsi les températures prises sont de 23 °C et 23,5 °C, avec une pression respective de 992,9 mBar et 992,7 mBar et une humidité relative de 50% au sein du Synchrotron. Nous avons alors les distances corrigées pour tous les points ZFL considérés selon les deux couples de valeur de pression et température.

Ce qui nous intéresse maintenant est l'impact de cette différence de correction sur la hauteur en utilisant la formule suivante :

$$h = D_{corr} \sin(\beta - 90)$$

avec

- $h$  la hauteur entre la station et le point ZFL-1 (m),
- $D_{corr}$  la distance corrigée (m),
- $\beta$  l'angle vertical observé depuis la station sur le tripode en visant le point ZFL-1 ( $^{\circ}$ ).

Les résultats obtenus pour le calcul des hauteurs issues des distances corrigées selon les deux couples de valeurs ainsi que les écarts associés à chaque point ZFL sont présentés dans le tableau suivant :

	hauteur calculée (m) T=23 °C et P=992,9 mBar	hauteur calculée (m) T=23,5 °C et P=992,7 mBar	écart ( $\mu\text{m}$ )
EXPH/A-ZFL/BM01-1	5,024854	5,024856	2,50
EXPH/A-ZFL/BM01-2	5,009185	5,009188	2,50
EXPH/A-ZFL/BM08-1	5,031774	5,031777	2,50
EXPH/A-ZFL/BM08-2	5,014840	5,014842	2,50
EXPH/A-ZFL/BM14-1	5,045700	5,045703	2,50
EXPH/A-ZFL/BM14-2	5,034214	5,034217	2,50
EXPH/A-ZFL/BM19-1	5,028686	5,028688	2,60
EXPH/A-ZFL/BM19-2	5,005619	5,005621	2,50
EXPH/A-ZFL/BM29-1	5,019693	5,019696	2,50
EXPH/A-ZFL/BM29-2	5,005457	5,005460	2,50

TABLE 5 – Hauteurs calculées selon les couples de valeurs et écarts associés

Nous pouvons constater que la moyenne des écarts entre les deux hauteurs obtenues issues des distances corrigées est de 2,5  $\mu\text{m}$ . Nous pouvons maintenant tenir compte de cette erreur dans les calculs réalisés par la suite en ajoutant cette erreur systématique aux hauteurs mesurées entre les stations sur les tripodes et les points ZFL dont la valeur est 2,5  $\mu\text{m}$ .

Cependant la température et la pression étant des paramètres difficiles à maîtriser précisément, une incertitude relative à l'erreur systématique déterminée précédemment sera introduite. Il est possible de considérer une incertitude sur la moyenne des écarts entre la moyenne des températures observées et la température de la station de 0,2  $^{\circ}\text{C}$ , c'est-à-dire une incertitude de 0,2  $^{\circ}\text{C}$  sur la détermination de la moyenne des écarts en température de 0,5  $^{\circ}\text{C}$ . Il en est de même pour la pression atmosphérique dont l'incertitude est évaluée à 0,1 mBar.

Ainsi, de la même manière que précédemment en prenant cette fois-ci comme couple (23  $^{\circ}\text{C}$ , 992,9 mBar) et (23,2  $^{\circ}\text{C}$ , 992,8 mBar) pour la correction des distances, nous obtenons **une incertitude  $u_h$  de 1  $\mu\text{m}$  sur l'erreur systématique déterminée** en suite à la non-prise en compte de la correction atmosphérique sur la distance correctement.

### Incertitude de la correction atmosphérique sur l'angle vertical

La magnitude d'erreur que l'on commet lors de la non-prise en compte correctement de la correction atmosphérique tout le long du trajet lumineux sur l'angle vertical peut également s'apparenter à une erreur systématique. Une expérience a été réalisée afin de déterminer la magnitude d'erreur commise. La Figure 24 ci-après illustre la manipulation réalisée.

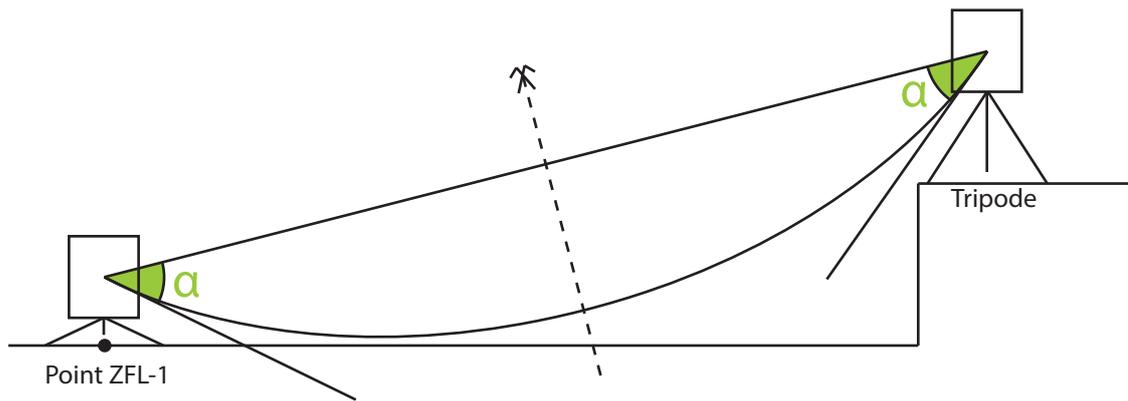


FIGURE 24 – Autocollimation entre deux appareils, l’un sur le point ZFL, l’autre sur le tripode du toit

L’expérience consiste en la mesure d’autocollimation. Un appareil est alors placé sur un tripode et un autre au niveau du point ZFL le plus éloigné de la ligne de lumière considérée. En émettant l’hypothèse que le système est symétrique, les angles observés des deux côtés permettent de déterminer l’angle vertical  $\alpha$  entre le chemin optique suivi par le rayon laser et la droite reliant les deux appareils :

$$\alpha = \frac{Av1 + Av2 - 200}{2}$$

avec

- $\alpha$  la différence angulaire entre le rayon théorique et le rayon vrai (gon),
- Av1 l’angle vertical mesuré à la station sur le point ZFL (gon),
- Av2 l’angle vertical mesuré à la station sur le tripode (gon).

Lors de cette manipulation les mesures ont été réalisées à l’aide d’un TM5100 placé sur le tripode et un T3000 dont l’embase a été directement posée sur le point ZFL considéré. Les observations ont été faites cercle à droite et cercle à gauche pour les deux appareils avec une répétition de 5 par cercle sur deux lignes de lumière différentes.

En combinant les visées cercle à droite et cercle à gauche, nous avons obtenu les résultats suivants :

ligne de lumière	BM01	BM29
angle (gon)	-0,00047	-0,00049
distance de visée (m)	47,4	48,18

FIGURE 25 – Moyenne des angles obtenus par ligne de lumière avec la distance de visée associée

Il s’avère que la moyenne de  $\alpha$  semble être constante selon les deux lignes de lumière, il serait alors possible de corriger cette erreur systématique directement lors des prochains calculs avec le logiciel GCP. Cependant un problème de signe persiste. La Figure 24 ci-dessus représente le chemin optique réel lorsque le gradient de température est descendant, autrement dit la zone la plus froide est en haut et celle la plus chaude au niveau du sol. Or dans notre cas, nous avons un gradient de température inversé dans le hall expérimental alors que le signe des résultats nous ferait croire l’inverse.

Ainsi, il semblerait que cet angle  $\alpha$  soit une erreur systématique. Suite à la présence d’un problème de signe lié à sa détermination, il est néanmoins préférable de ne pas considérer ces valeurs comme une erreur systématique et de les traiter comme une incertitude en n’appliquant aucune correction systématique dans le calcul par moindres carrés.

Cette manipulation aurait été intéressante à effectuer sur les différents types de visées possibles à l’AT401 présents dans la méthode proposée. Cependant, par manque de temps, seules deux lignes de lumière ont été faites en mettant une station sur le point ZFL le plus éloigné du toit. Suite aux résultats obtenus, nous

pouvons remarquer qu'il semblerait y avoir une corrélation entre les angles et la distance de visée. Ainsi, l'angle sera ramené à 1 m pour qu'ensuite l'incertitude appliquée pour chaque visée soit adaptée selon la distance de visée.

La moyenne générale de l'angle étant de -0,00048 gon à environ 48 m, ce qui signifie -0,00001 gon pour 1 m, une incertitude de **-0,16 ppm** est alors associée à cette magnitude d'erreur que l'on commet en ne prenant pas en compte la correction atmosphérique selon l'angle vertical. Ainsi dans le calcul d'incertitudes, cette valeur de -0,16 ppm sera directement multipliée par les distances de visée pour chaque observation.

### Temps de chauffe de l'AT401

Il semblerait que le temps de chauffe de l'appareil AT401 ait une importance. Rémy CHAURAND a réalisé une étude à ce sujet dans le cadre de son TFE [7].

Il en résulte que l'appareil dérive de 0,0040 gon en 9 h, ce qui représente 0,6 mm à 10 m. Les écarts semblent se stabiliser au bout de 3 h mais la période de 1 h 30 après l'allumage de l'appareil est la moins adéquate pour réaliser des mesures.

Si nous souhaitons atteindre des précisions inférieures au dixième de millimètre sur les dénivelées, il est nécessaire de prendre en compte ce temps de chauffe. Ainsi un temps minimal d'une heure trente de chauffe devra être réalisé avant tout emploi de l'appareil AT401 afin de limiter les pertes de précisions sur les mesures.

### 2.5.3 Calcul global

Le calcul global de l'incertitude type prend donc en compte toutes les incertitudes types déterminées précédemment qui sont récapitulées dans le tableau suivant :

incertitude de type A $u_a$	130 $\mu\text{m}$
incertitude trusquin $u_t$	14 $\mu\text{m}$
précision des capteurs $u_c$	2 $\mu\text{m}$
étalonnage des capteurs $u_e$	0,042 $\mu\text{m}$
mesure angulaire absolue $u_\beta$	$\pm 7,5 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m}/\text{m}$
mesure de distance absolue $u_d$	$\pm 5 \mu\text{m}$
incertitude sur l'erreur systématique de hauteur $u_h$	1 $\mu\text{m}$
incertitude correction atmosphérique selon l'angle vertical $u_\alpha$	-0,16 ppm

TABLE 6 – Récapitulatif des incertitudes prises en compte

L'incertitude type  $u$  associée aux dénivelées indirectes fait intervenir les incertitudes de mesure angulaire absolue  $u_\beta$  et de mesure de distance absolue  $u_d$  dans une équation vue précédemment qui dépend des observations de distance et d'angle vertical propre à chaque visée.

Le calcul global de l'incertitude type est l'application de la somme quadratique des incertitudes types intervenant selon chaque terme de l'équation de la détermination d'un point ZFL à partir de Survey Monuments, rappelée ci-dessous :

$$dH_{SM-ZFL} = -H_{SM-st1}^{SR} - H_{st1-HLS1}^{SR} - h_{HLS1}^{SR} - l_{capteur1}^{SR} + l_{capteur2}^{SR2} + h_{HLS2}^{SR2} + H_{HLS2-st2}^{SR2-roof} \\ + H_{st2-HLS3}^{SR2-roof} - h_{HLS3}^{roof} - l_{capteur3}^{roof} + l_{capteur4}^{roof} + h_{HLS4}^{roof} + H_{HLS4-st3}^{roof} - H_{st3-ZFL}^{roof}$$

Le calcul effectué pour déterminer l'incertitude globale type est le suivant :

$$u_{globale} = \sqrt{(u_a)^2 + 4(u_t)^2 + 4(u_c)^2 + 4(u_e)^2 + \overline{(u_{SM-st1}^{SR})^2} + \overline{(u_{st1-HLS1}^{SR})^2} + \overline{(u_{HLS2-st2}^{SR2-roof})^2} + \overline{(u_{st2-HLS3}^{SR2-roof})^2} + \overline{(u_{HLS4-st3}^{roof})^2} + \overline{(u_{st3-ZFL}^{roof})^2} + 6(u_h)^2 + \left(\overline{(u_\alpha)_{SM-st1}^{SR}}\right)^2 + \left(\overline{(u_\alpha)_{st1-HLS1}^{SR}}\right)^2 + \left(\overline{(u_\alpha)_{HLS2-st2}^{SR2-roof}}\right)^2 + \left(\overline{(u_\alpha)_{st2-HLS3}^{SR2-roof}}\right)^2 + \left(\overline{(u_\alpha)_{HLS4-st3}^{roof}}\right)^2 + \left(\overline{(u_\alpha)_{st3-ZFL}^{roof}}\right)^2}$$

Pour l'incertitude relative à la dénivelée indirecte, la distance et l'angle vertical entre la station et le point visé sont pris en compte, de même pour l'incertitude sur la correction atmosphérique selon l'angle vertical où seule la distance est considérée. Ces deux incertitudes ont été calculées pour chaque point visé de chaque station associée, et une moyenne de ces incertitudes a été effectuée pour chaque type de visée, exceptée la visée sur les points ZFL.

Le tableau suivant recense les résultats des incertitudes associées à chaque point ZFL :

nom du point	$u_{globale}$ (mm)	nom du point	$u_{globale}$ (mm)
ZFL BM01-1	0,206	ZFL BM01-2	0,160
ZFL BM08-1	0,208	ZFL BM08-2	0,165
ZFL BM14-1	0,209	ZFL BM14-2	0,168
ZFL BM19-1	0,210	ZFL BM19-2	0,178
ZFL BM29-1	0,208	ZFL BM29-2	0,158

TABLE 7 – Détermination de l'incertitude globale type

Les résultats donnent une première idée de ce à quoi l'on peut s'attendre. Nous pouvons observer que les incertitudes sont les plus grandes sur les plus longues visées. De plus, il semblerait que l'incertitude pour un point soit dans tous les cas inférieure ou égale à deux dixièmes de millimètre.

Une fois l'incertitude globale type établie, il est alors possible de calculer l'incertitude globale élargie qui représente deux fois l'incertitude type déterminée, ce qui nous donne :

nom du point	$u_{globale}$ (mm)	nom du point	$u_{globale}$ (mm)
ZFL BM01-1	0,412	ZFL BM01-2	0,319
ZFL BM08-1	0,416	ZFL BM08-2	0,330
ZFL BM14-1	0,418	ZFL BM14-2	0,337
ZFL BM19-1	0,420	ZFL BM19-2	0,356
ZFL BM29-1	0,415	ZFL BM29-2	0,316

TABLE 8 – Détermination de l'incertitude globale élargie

Enfin, cette valeur d'incertitude est grandement influencée par la précision de l'AT401 sur les mesures angulaires absolues. Ne serait-il pas possible de la réduire ?

### 3 Amélioration de la méthode et mise en oeuvre pratique

#### 3.1 Vers une méthode de transfert précis

Après avoir défini une nouvelle méthode pour la détermination des points ZFL pouvant s'effectuer à n'importe quel instant selon le besoin, et après avoir analysé les premiers résultats et calculé les incertitudes associées à chaque point ZFL, cette partie présentera les améliorations envisagées.

##### 3.1.1 Possibilité de la réduction des visées

Suite aux analyses des premiers résultats et au calcul d'incertitudes, nous pouvons constater que ce qui influence le plus les résultats est la longueur des visées. La longueur la plus importante se situe entre la station effectuée depuis les tripodes et surtout le point ZFL-1 qui est le plus éloigné et dont les visées sont souvent aux alentours de 50 m. La distance des visées influence également la précision des mesures angulaires absolues puisqu'elle en dépend directement.

La première amélioration prévue fut d'essayer de réduire la longueur des visées tout en effectuant toujours qu'une seule station pour la liaison. De ce fait il a été envisagé d'utiliser un tripode dont l'emplacement permettrait d'avoir des visées vers les deux points ZFL plus courtes. La *Figure 26* retranscrit l'idée.

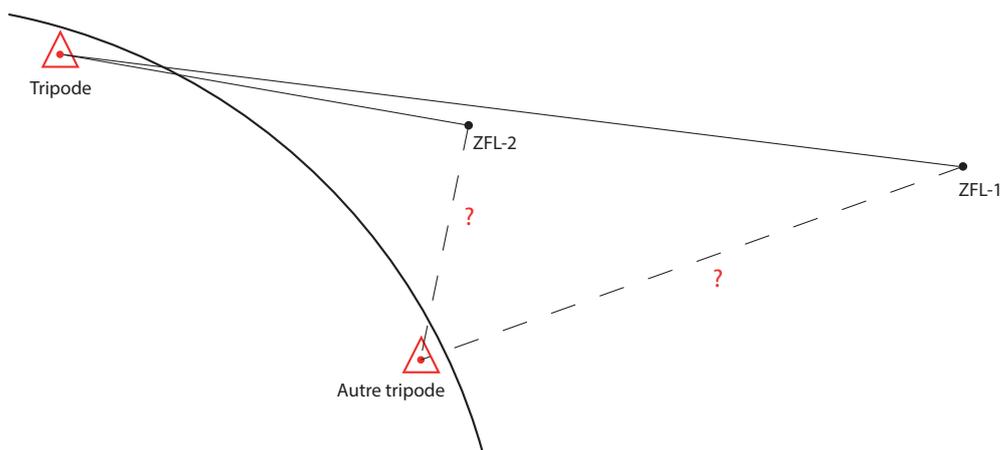


FIGURE 26 – Possibilité de la réduction des visées

Cela aurait permis de gagner en précision et donc d'améliorer notamment le calcul d'incertitudes. Cependant sur le terrain, nous pouvons remarquer que les visées sur les deux points d'une ligne de lumière spécifique n'étaient possibles qu'à partir du tripode dans le prolongement des deux points. La visée à partir d'autres tripodes que celui dans l'axe des deux points est obstruée par des éléments tels que des cabines optiques ou expérimentales. Par conséquent il n'est pas possible de modifier la méthode de cette manière.

### 3.1.2 Amélioration du calcul d'incertitudes

Comme précisé précédemment, la distance des visées est le paramètre ayant l'impact le plus important sur la détermination de l'incertitude associée aux points ZFL. Étant donné qu'il n'est pas possible de modifier la position des stations afin de réduire cette longueur, il est alors nécessaire de trouver une solution alternative.

L'une des possibilités envisagée est d'effectuer un test de répétabilité afin de définir le nombre de fois qu'une mesure doit être prise en réduisant par la même occasion l'incertitude associée. Un test de répétabilité a donc été réalisé permettant la détermination du nombre de fois qu'une mesure doit se faire afin d'obtenir une incertitude plus intéressante.

Les mesures prises pour le test de la répétabilité sont celles du transfert entre l'anneau de stockage et le toit en D07 en effectuant la manipulation complète 35 fois depuis la station dans le hall expérimental et 20 fois depuis celle du toit ainsi que les mesures du transfert des capteurs HLS du toit vers les points ZFL de la ligne de lumière BM08 en répétant la manipulation 20 fois.

À l'aide des mesures effectuées, nous pouvons calculer un écart-type de la détermination de la hauteur entre la station sur le tripode et les points ZFL considérés. Il est alors possible de comparer l'incertitude théorique sur cette hauteur à celle obtenue expérimentalement. Les valeurs sont recensées dans le tableau suivant :

	incertitude théorique (mm)	incertitude réelle (mm)
EXPH/A-ZFL/BM08-1	0,140	0,098
EXPH/A-ZFL/BM08-2	0,070	0,046

TABLE 9 – Incertitude théorique et incertitude réelle sur la hauteur entre la station sur le tripode et le point ZFL

Ces résultats nous montrent que la théorie n'est pas représentative de la réalité car nous obtenons par la mesure une incertitude plus faible que celle théorique. Ainsi cela prouve que l'incertitude théorique calculée ne tient pas compte de nos conditions de prises de mesures.

Pour déterminer le nombre de mesures à prendre par point visé, plusieurs étapes doivent être réalisées :

- calcul de l'écart-type de l'ensemble des mesures prises pour chaque visée,
- calcul de l'écart-type des mesures moyennées par deux pour chaque visée,
- calcul de l'écart-type des mesures moyennées par groupes de trois pour chaque visée,
- calcul de l'écart-type des mesures moyennées par groupes de quatre pour chaque visée,
- calcul de l'écart-type des mesures moyennées par groupes de cinq pour chaque visée.

Les valeurs obtenues pour les points ZFL sont présentées dans le tableau ci-dessous :

	écart-type (mm)				
	1 mesure	2 mesures	3 mesures	4 mesures	5 mesures
EXPH/A-ZFL/BM08-1	0,098	0,045	0,032	0,026	0,010
EXPH/A-ZFL/BM08-2	0,046	0,027	0,017	0,007	0,017

TABLE 10 – Évolution des écarts-types en fonction du nombre de mesures par visée

Il faut trouver le bon compromis entre un écart-type adapté et un investissement raisonnable sur le terrain concernant le nombre de mesures à prendre par point. Un constat général confirmé par les valeurs du tableau précédent a pu être établi : **trois mesures** semblent être un bon compromis.

Si nous considérons que faire trois mesures pour chaque point est un bon compromis, alors en théorie nous pouvons diviser l'incertitude par  $\sqrt{3}$ , ce qui revient à :

$$\pm 7,5 \mu\text{m} + \frac{3}{\sqrt{3}} \mu\text{m}/\text{m} = \pm 7,5 \mu\text{m} + 1,7 \mu\text{m}/\text{m}$$

Seul le coefficient dépendant directement de la distance est divisé car c'est celui présentant le plus d'influence. De plus, par expérience, si nous divisons l'écart-type obtenu pour une mesure par l'écart-type obtenu pour trois mesures nous retombons sur la racine carrée de trois.

Une autre méthode permet de déterminer la nouvelle incertitude correspondant à trois mesures par point qui sera plus avantageuse. Nous avons réalisé un graphique (Figure 27) recensant les écarts-types sur trois mesures issus des calculs précédents pour les différentes visées effectuées en fonction de la distance. Nous calculons une régression linéaire à partir des écarts-types, droite que nous décalons alors afin d'envelopper tous les écarts-types. Cela fournit la nouvelle incertitude :

$$\pm 15 \mu\text{m} + 0,6 \mu\text{m}/\text{m}$$

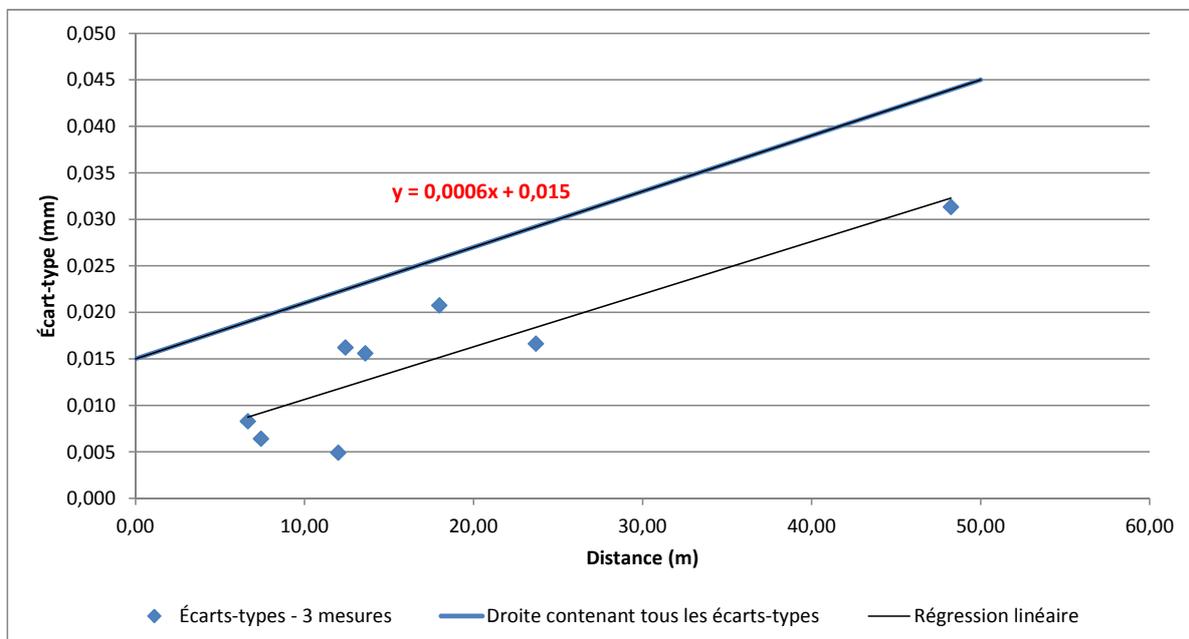


FIGURE 27 – Détermination de la nouvelle incertitude

Cependant cette nouvelle incertitude semble trop précise par rapport à la réalité terrain, ainsi l'incertitude  $\pm 7,5 \mu\text{m} + 1,7 \mu\text{m}/\text{m}$  sera donc appliquée.

En effectuant un calcul d'ajustement des observations réalisées lors du Shutdown du mois de mars tenant compte de cette nouvelle incertitude, nous obtenons un facteur unitaire de variance de 0,79 contre 0,67 lors des premiers résultats. Cela signifie que la précision déterminée ci-dessus est plus adaptée. Nous pouvons constater qu'avec une précision davantage proche de la réalité nous obtenons une **moyenne des écarts de 0,117 mm** et un **écart-type de 0,068 mm**, autrement dit une amélioration de tous les différents paramètres.

À ce stade, un nouveau calcul d'incertitudes a été réalisé en intégrant cette nouvelle valeur. Nous obtenons donc les résultats recensés dans le tableau suivant :

nom du point	$u_{globale}$ (mm)	nom du point	$u_{globale}$ (mm)
ZFL BM01-1	0,320	ZFL BM01-2	0,284
ZFL BM08-1	0,322	ZFL BM08-2	0,288
ZFL BM14-1	0,323	ZFL BM14-2	0,290
ZFL BM19-1	0,324	ZFL BM19-2	0,298
ZFL BM29-1	0,322	ZFL BM29-2	0,283

TABLE 11 – Détermination de la nouvelle incertitude globale élargie

Ainsi l'incertitude associée à un point ZFL peut être considérée comme environ égale à 0,300 mm.

### 3.1.3 Détermination de la constante du capteur pour le zéro de lecture

Lors de l'analyse des premiers résultats issus du calcul avec les données brutes, nous nous sommes aperçus qu'il fallait intégrer la constante du zéro de lecture notamment des capteurs HLS présents dans l'anneau de stockage. Jusqu'à présent l'ESRF utilisait les capteurs HLS de manière relative donc ces constantes n'ont jamais été caractérisées. L'utilisation des capteurs dans la méthode choisie nous amène à devoir déterminer cette constante afin d'avoir une valeur associée à chaque capteur reflétant davantage la réalité que de prendre la moyenne des écarts comme valeur pour tous les capteurs HLS.

De ce fait, nous allons non seulement mesurer les constantes du zéro de lecture des capteurs HLS situés dans l'anneau de stockage dont la valeur a été estimée précédemment à 3,6 mm mais aussi ceux présents sur le toit dont la valeur approximative est 0 mm.

#### Les capteurs HLS de 3<sup>ème</sup> génération

Pour déterminer cette constante du zéro de lecture, nous allons définir une surface de référence qui servira à la fois de référence pour les lectures faites à l'aide du capteur HLS et les mesures réalisées à l'AT401. Un prisme sera posé sur la surface de référence qui sera préalablement horizontalisée et un autre sera posé sur le support magnétique situé sur le dessus du capteur HLS. Ainsi en connaissant le diamètre du prisme 38,1 mm, la hauteur des supports magnétiques non usinés réhaussant de 5,95 mm et la mesure au trusquin pour chaque capteur HLS, nous pouvons en déduire cette constante du zéro de lecture, comme l'indique la *Figure 28*.

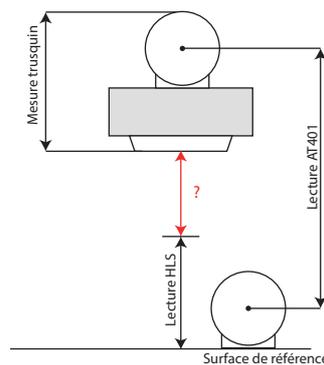


FIGURE 28 – Détermination de la constante des capteurs HLS de troisième génération

Cette manipulation, que les *Figure 29* et *Figure 30* illustrent, est réalisée pour chaque capteur HLS de l'anneau de stockage en mettant le capteur HLS dans trois positions différentes grâce à la plateforme motorisée sur laquelle il se trouve. Ainsi nous obtenons trois lectures pour un capteur HLS donné associées à trois hauteurs mesurées à l'aide de l'AT401.

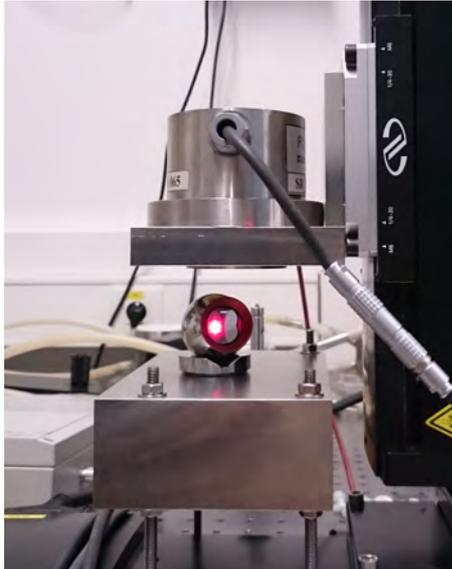


FIGURE 29 – Mesure de la surface de référence à l'AT401

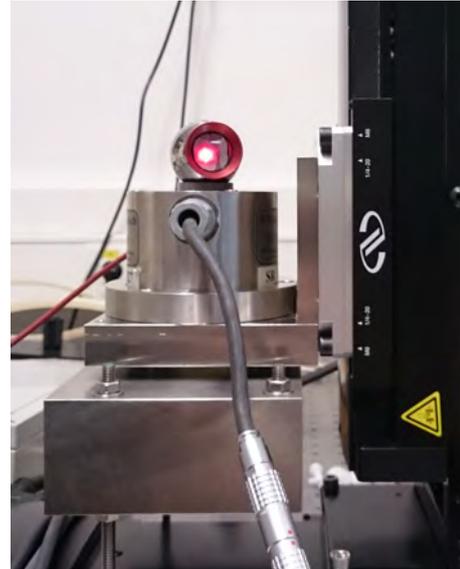


FIGURE 30 – Lecture du capteur de la surface de référence

L'équation associée à la détermination de la constante est la suivante :

$$H_{AT401} + 44.05 \text{ mm} = h_{trusquin} + l_{capteurHLS} + cste$$

En utilisant l'équation ci-dessus, nous obtenons les résultats suivants :

nom capteur HLS	constante (mm)	nom capteur HLS	constante (mm)
SR/A-HLS1/C01G10-1	3,750	SR/A-HLS1/C01G10-3	3,660
SR/A-HLS1/C07G10-1	3,740	SR/A-HLS1/C07G10-3	3,800
SR/A-HLS1/C12G10-1	3,760	SR/A-HLS1/C12G10-3	3,810
SR/A-HLS1/C20G10-1	3,780	SR/A-HLS1/C20G10-3	3,770
SR/A-HLS1/C26G10-1	3,720	SR/A-HLS1/C26G10-3	3,850

TABLE 12 – Constante du zéro de lecture des capteurs de troisième génération

### Les capteurs HLS de 2<sup>ème</sup> génération

De la même manière que précédemment, nous pouvons déterminer la constante associée aux capteurs de 2<sup>ème</sup> génération. La manipulation change légèrement de par le fait que l'extrémité supérieure du capteur forme une coupelle afin d'y accueillir directement une boule Taylor Hobson de 88,9 mm de diamètre. Ainsi nous avons :

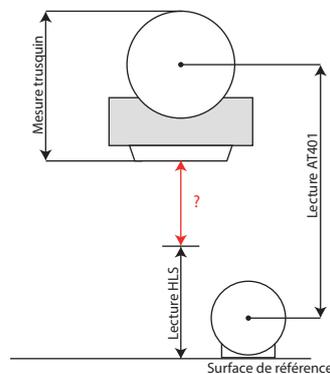


FIGURE 31 – Détermination de la constante des capteurs HLS de deuxième génération

L'équation associée à cette manipulation est la suivante :

$$H_{AT401} + 69,45 \text{ mm} = h_{trusquin} + l_{\text{capteurHLS}} + cste$$

Ainsi nous obtenons les constantes du zéro de lecture des capteurs :

nom capteur HLS	constante (mm)	nom capteur HLS	constante (mm)
EXPH/A-HLS1/C1	0,126	EXPH/A-HLS1/C15	0,109
EXPH/A-HLS1/C2	0,101	EXPH/A-HLS1/C19	0,115
EXPH/A-HLS1/C7	0,136	EXPH/A-HLS1/C19U	0,115
EXPH/A-HLS1/C07U	0,114	EXPH/A-HLS1/C19D	0,145
EXPH/A-HLS1/C07D	0,149	EXPH/A-HLS1/C20	0,124
EXPH/A-HLS1/C8	0,124	EXPH/A-HLS1/C21	0,126
EXPH/A-HLS1/C9	0,123	EXPH/A-HLS1/C29	0,094
EXPH/A-HLS1/C14	0,132	EXPH/A-HLS1/C30	0,118

TABLE 13 – Constante du zéro de lecture des capteurs de deuxième génération

### Prise en compte dans le traitement des mesures

En prenant en compte toutes les améliorations citées ci-dessus, nous obtenons des écarts inférieurs à 0,2 mm, entre les résultats issus de la méthode utilisant le système HLS et ceux issus des campagnes de nivellement, avec une **moyenne de 0,096 mm** et un **écart-type de 0,069 mm**. Nous pouvons constater une légère amélioration dans les résultats, ce qui les rend plus conformes à la réalité terrain.

#### 3.1.4 Étude des polynômes de correction appliqués aux différents capteurs HLS

Afin d'obtenir une distance à l'aide des capteurs HLS, la valeur brute mesurée est corrigée en y appliquant un polynôme de transformation de la forme :

$$H_{air} = a + bV + cV^2$$

Actuellement, les capteurs HLS présents sur le toit sont régis par un polynôme de transformation générique dont les coefficients, déterminés lors de la première mise en place de capteurs à l'ESRF, sont la moyenne de tous les capteurs du toit.

Sur les 32 capteurs présents sur le toit, 7 d'entre eux ont été calibrés à l'aide du banc d'étalonnage présent à l'ESRF prévu à cet effet : C05, C07, C10, C21, C30, C31 et C32. Ainsi les coefficients du polynôme de calibration pour les 7 capteurs HLS ainsi que les coefficients du polynôme générique commun à tous les capteurs sont connus et récapitulés dans le tableau suivant.

Coefficients	a	b	c	d
<b>Générique</b>	5,9999600	0,2505300	-0,0000523	
<b>Roof C05</b>	2,4968414	0,2495489	-0,0000474	0,0000014
<b>Roof C07</b>	2,4911958	0,2502751	-0,0000350	0,0000005
<b>Roof C10</b>	2,4989080	0,2505525	-0,0000381	0,0000007
<b>Roof C21</b>	2,5030176	0,2503619	-0,0000389	0,0000005
<b>Roof C30</b>	2,5026848	0,2507670	-0,0000465	0,0000009
<b>Roof C31</b>	2,5067910	0,2506828	-0,0000304	0,0000005
<b>Roof C32</b>	2,5033665	0,2499933	-0,0000405	0,0000005

TABLE 14 – Coefficients du polynôme générique et ceux issus de la calibration des capteurs HLS

Pour comparer les deux polynômes entre eux, il suffit de les étudier selon une plage de lecture définie préalablement telle que l'intervalle [0V; 10V]. Nous pouvons constater à l'aide du tableau ci-dessus que pour le premier coefficient  $a$  entre celui du polynôme générique et ceux issus de la calibration des capteurs, il y a un écart constant de 3,5 mm, autrement dit le zéro de lecture est décalé de 3,5 mm. Il sera alors nécessaire d'ajouter cette constante aux mesures issues des polynômes de calibration pour effectuer une meilleure comparaison.

Nous pouvons observer graphiquement le polynôme issu de la calibration du capteur HLS C05 par rapport au polynôme générique.

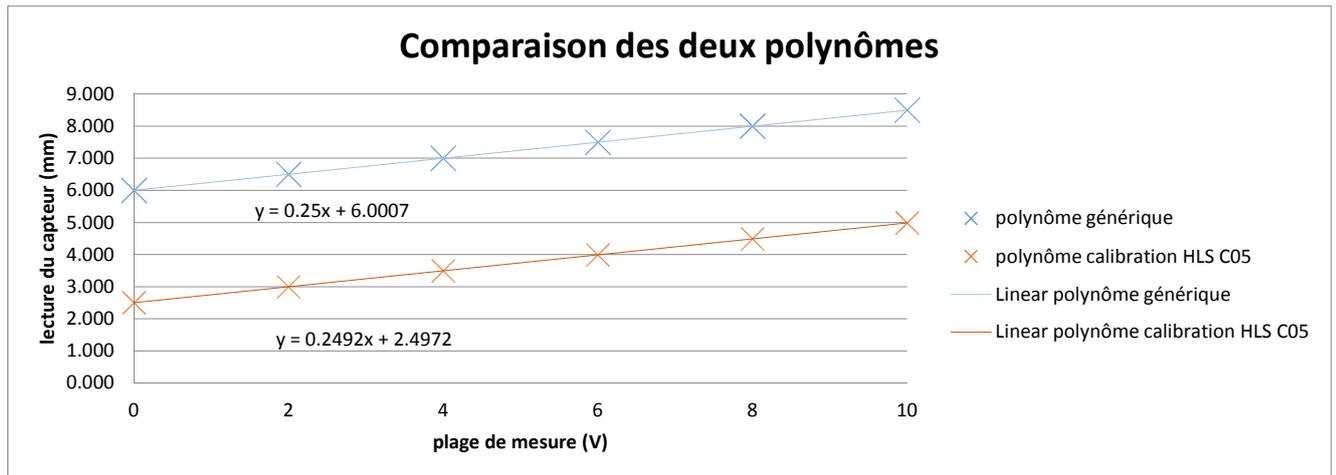


FIGURE 32 – Graphique comparaison

Visuellement, les polynômes semblent être égaux à une constante près. Lorsque nous effectuons les écarts pour une distance donnée entre la calibration et le polynôme générique en tenant compte de la constante 3,5 mm, nous obtenons les écarts maxima entre les deux types de polynômes suivant le capteur HLS.

	écarts max absolu (mm)	écarts 0V (mm)
<b>Roof C05</b>	0.011	0.003
<b>Roof C07</b>	0.010	0.009
<b>Roof C10</b>	0.001	0.001
<b>Roof C21</b>	0.006	-0.003
<b>Roof C30</b>	0.007	-0.003
<b>Roof C31</b>	0.011	-0.007
<b>Roof C32</b>	0.009	-0.003

TABLE 15 – Écarts entre les deux types de polynômes pour chaque capteur HLS

Les écarts sont très faibles, ils sont tous inférieurs ou égaux au centième de millimètre. Les écarts par rapport au 0 V sont de l'ordre de quelques micromètres.

Nous pouvons ainsi calculer l'écart-type  $StDev1$  des écarts entre le polynôme issu de la calibration et le polynôme générique pour chacun des capteurs HLS. Connaissant l'écart-type sur l'étalonnage des capteurs  $StDev2$ , nous pouvons calculer une incertitude totale  $U$ , somme quadratique des deux écarts-types  $StDev1$  et  $StDev2$ .

ref capteur	nom capteur	écart-type		incertitude totale U (mm)
		polynôme (mm) StDev1	étalonnage (mm) StDev2	
FE_153	<b>Roof C05</b>	0,0030	0,00004	0,0030
FE_029	<b>Roof C07</b>	0,0003	0,00005	0,0003
FE_140	<b>Roof C10</b>	0,0009	0,00004	0,0009
FE_123	<b>Roof C21</b>	0,0002	0,00004	0,0002
FE_167	<b>Roof C30</b>	0,0014	0,00003	0,0014
FE_040	<b>Roof C31</b>	0,0016	0,00003	0,0016
FE_044	<b>Roof C32</b>	0,0014	0,00011	0,0014
écart-type général		0,0061		0,0061
moyenne étalonnage		0,00005		

TABLE 16 – Tableau présentant les incertitudes

Ainsi nous pouvons constater que l'écart-type issu de l'étalonnage est très faible, inférieur au micromètre donc a peu d'influence. De plus, l'écart-type comprenant l'ensemble des valeurs des différents capteurs calibrés est de 0,0061 mm avec une moyenne de l'étalonnage à 0,00005 mm, cela nous donne une incertitude d'ensemble de 0,0061 mm.

Il semblerait que l'influence du type de polynôme de transformation utilisé soit très faible. Cependant cette incertitude calculée sera prise en compte lors du calcul d'incertitudes même si elle n'aura pas beaucoup d'influence.

### 3.1.5 Conclusion

D'après les améliorations qui ont été faites, l'ajustement des mesures prend en compte plusieurs paramètres de corrections :

- la correction des dénivelées de la courbure terrestre,
- l'erreur systématique de la correction atmosphérique sur la distance pour les visées sur les points ZFL dont la valeur est 2,5  $\mu\text{m}$ ,
- la constante du zéro de lecture propre à chaque capteur,
- un poids adapté selon le type d'instrument utilisé et notamment la détermination de la nouvelle précision associée aux mesures prises à l'AT401 de  $\pm 7.5 \mu\text{m} + 1.7 \mu\text{m}/\text{m}$ .

Les résultats obtenus sont recensés dans le tableau suivant :

Nom du point	Altitude calculée (m)	Précision a posteriori	Altitude campagne (m)	Écart des altitudes (m)
EXPH/A-ZFL/BM01-1	205,29807	0,07	205,29806	0,00001
EXPH/A-ZFL/BM01-2	205,31360	0,05	205,31352	0,00008
EXPH/A-ZFL/BM08-1	205,30706	0,07	205,30696	0,00010
EXPH/A-ZFL/BM08-2	205,32385	0,05	205,32370	0,00015
EXPH/A-ZFL/BM14-1	205,29286	0,08	205,29281	0,00005
EXPH/A-ZFL/BM14-2	205,30422	0,06	205,30418	0,00004
EXPH/A-ZFL/BM19-1	205,29640	0,05	205,29620	0,00019
EXPH/A-ZFL/BM19-2	205,31936	0,04	205,31922	0,00014
EXPH/A-ZFL/BM29-1	205,30463	0,08	205,30462	0,00001
EXPH/A-ZFL/BM29-2	205,31871	0,05	205,31852	0,00019

TABLE 17 – Résultats obtenus en tenant compte de toutes les améliorations

Tous les écarts sont inférieurs à 0,2 mm avec une **moyenne de 0,096 mm** et un **écart-type de 0,069 mm**.

Le calcul global de l'incertitude type final prend en compte toutes les incertitudes types qui sont récapitulées dans le tableau suivant :

incertitude de type A $u_a$	130 $\mu\text{m}$
incertitude trusquin $u_t$	14 $\mu\text{m}$
précision des capteurs $u_c$	2 $\mu\text{m}$
étalonnage des capteurs $u_e$	0,042 $\mu\text{m}$
type de polynôme utilisé $u_p$	6,1 $\mu\text{m}$
mesure angulaire absolue $u_\beta$	$\pm 7,5 \mu\text{m} + 1,7 \mu\text{m}/\text{m}$
mesure de distance absolue $u_d$	$\pm 5 \mu\text{m}$
incertitude sur l'erreur systématique de hauteur $u_h$	1 $\mu\text{m}$
incertitude correction atmosphérique selon l'angle vertical $u_\alpha$	-0,16 ppm

TABLE 18 – Récapitulatif des incertitudes prises en compte

En effectuant la somme quadratique des incertitudes citées ci-dessus, nous obtenons les incertitudes élargies associées à chaque point ZFL recensées dans le tableau suivant :

nom du point	$u_{globale}$ (mm)	nom du point	$u_{globale}$ (mm)
ZFL BM01-1	0,322	ZFL BM01-2	0,286
ZFL BM08-1	0,324	ZFL BM08-2	0,290
ZFL BM14-1	0,325	ZFL BM14-2	0,293
ZFL BM19-1	0,325	ZFL BM19-2	0,300
ZFL BM29-1	0,323	ZFL BM29-2	0,285

TABLE 19 – Détermination de l'incertitude globale élargie

Nous pouvons alors constater que de manière générale les écarts entre les deux méthodes sont légèrement plus faibles mais que les améliorations ont été bénéfiques surtout au niveau du calcul d'incertitudes. Ainsi les incertitudes globales élargies sur les points ZFL les plus éloignés du toit (ZFL-1) ont été réduites de presque un dixième de millimètre et sur les points ZFL les plus proches (ZFL-2) de trois à quatre centièmes de millimètres. Cela permet ainsi d'améliorer l'incertitude globale élargie de manière significative.

Nous obtenons donc une incertitude élargie maximale de 0,327 mm, permettant d'envelopper l'incertitude de tous les points ZFL.

### 3.2 Détermination de la fréquence des mesures

Il est intéressant à ce stade, si le besoin de déterminer les deux points ZFL d'une ligne de lumière spécifique se fait sentir, de savoir quelles sont les mesures qu'il faut réellement effectuer et s'il est nécessaire de toutes les effectuer à nouveau. Nous allons étudier dans cette partie l'évolution des différentes sections du cheminement complet prises séparément au cours du temps afin de déterminer si les mesures doivent être effectuées à chaque fois que l'on souhaite redéfinir des points ZFL en altitude.

Ainsi les questions que nous nous poserons sont :

- quelle est l'évolution de la hauteur mesurée au cours du temps ?
- peut-on considérer ces écarts comme constants ?
- a-t-on besoin de mesurer cette section à chaque fois que la redétermination de points ZFL d'une ligne de lumière est nécessaire ?

#### 3.2.1 Évolution des poutres de l'anneau de stockage

La première section étudiée est celle présente dans l'anneau de stockage. La hauteur qui est mesurée et étudiée au cours du temps est celle définie entre le Survey Monument et la surface du capteur permettant les lectures. Nous pouvons constater de faibles écarts entre les mesures prises au mois de mars et celles du mois de juin 2015.

	h en mars (mm)	h en juin (mm)	écart (mm)
SR/A-GS24/C1E	859,445	859,440	0,005
SR/A-GQD6/C1S	859,322	859,327	-0,004
SR/A-GQD8/C7E	859,254	859,323	-0,069
SR/A-GQD6/C7S	858,967	859,041	-0,074
SR/A-GS4/C12E	858,703	858,747	-0,044
SR/A-GQD3/C12S	858,530	858,581	-0,051
SR/A-GS4/C20E	858,897	858,911	-0,014
SR/A-GQD3/C20S	859,157	859,116	0,041
SR/A-GQD1/C26E	859,264	859,288	-0,024
SR/A-GQD3/C26S	859,231	859,276	-0,045

TABLE 20 – Évolution des poutres du SR

La stabilité des poutres, énoncée par Benoît PASSOT [2] et vérifiée expérimentalement, tendrait à faire penser que les écarts seront relativement faibles sur une longue période et qu'il ne sera pas nécessaire de refaire à chaque fois les mesures. Cela serait un avantage certain car la contrainte de devoir accéder à l'anneau de stockage, qui n'est possible que le mardi lors de l'arrêt machine en dehors de Shutdowns, n'existerait plus. Cependant, il serait intéressant d'effectuer des mesures de contrôle dans le temps afin de s'assurer pleinement de la stabilité.

#### 3.2.2 Mesures de transfert du SR au toit

La deuxième section étudiée est le transfert entre l'anneau de stockage et le toit. Elle correspond à la hauteur mesurée entre le capteur HLS du réseau de l'anneau de stockage situé à l'extérieur et le capteur HLS sur le toit. Afin d'observer l'évolution de cette hauteur au cours du temps, la prise de mesures a été effectuée lors du Shutdown de mars ainsi que les cinq semaines suivantes et enfin lors du Shutdown de juin. Le graphique ci-après recense l'évolution des hauteurs mesurées chaque semaine pour chaque station effectuée.

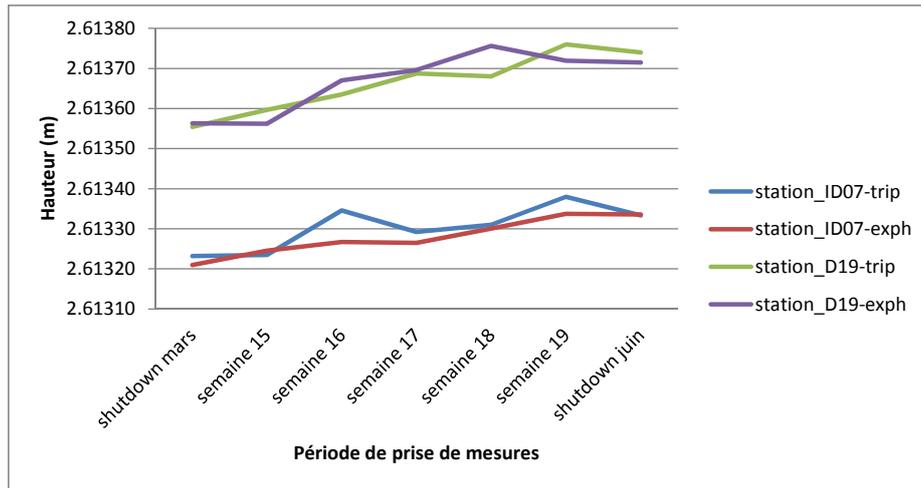


FIGURE 33 – Évolution des hauteurs

Nous pouvons constater qu’il y a de légers mouvements d’oscillation d’une semaine sur l’autre, toutefois, ces mouvements restent relativement faibles. Nous pouvons également observer que la tendance générale est l’augmentation de cette hauteur mesurée. Dans le tableau suivant nous pouvons constater les écarts maximaux que nous pouvons avoir à une station donnée tout au long de la période de mesures. Les écarts sont donc tous inférieurs ou égaux à deux dixièmes de millimètre.

nom station	écart max (m)
station_ID07-trip	0,00015
station_ID07-exph	0,00013
station_D19-trip	0,00021
station_D19-exph	0,00019

TABLE 21 – Écart maximal pour chaque station sur la période de 6 semaines

Les valeurs obtenues semblent légèrement élevées. De ce fait, nous pouvons soit les intégrer dans le calcul d’incertitudes et ainsi ne pas mesurer à chaque nouvelle détermination d’un point ZFL cette hauteur et donc réutiliser les mesures effectuées lors des Shutdowns, soit mesurer cette hauteur à chaque fois. Il serait intéressant de voir son évolution au-delà de quelques mois. Ainsi, si à long terme l’évolution est relativement stable, il serait possible d’intégrer les résultats directement dans le calcul d’incertitudes, ou au contraire refaire ces mesures lors d’une nouvelle détermination d’un point ZFL, prise de mesures relativement rapide à effectuer. De ce fait, le peu de temps d’observation ne permet pas à déterminer l’évolution de la section avec précision.

### 3.2.3 Mesures de transfert du toit aux ZFL

La dernière section étudiée est le transfert entre les capteurs HLS du toit et les points ZFL du hall expérimental. Des mesures reliant les capteurs HLS du toit aux points ZFL de chaque ligne de lumière ont été effectuées au cours du Shutdown de mars ainsi que les cinq semaines suivantes comme la section précédente. Le tableau suivant représente les écarts maximaux obtenus pour chaque point ZFL au cours de la période de mesures. Nous pouvons observer que les écarts sont compris entre un et cinq dixièmes de millimètre pour le point ZFL le plus proche de la station contrairement au point ZFL le plus éloigné qui oscille entre trois et sept dixièmes de millimètres.

capteur HLS toit	point ZFL	écart max (m)	capteur HLS toit	point ZFL	écart max (m)
.../C01_u	.../BM01-1	0,00063	.../C01_u	.../BM01-2	0,00034
.../C02_u	.../BM01-1	0,00065	.../C02_u	.../BM01-2	0,00009
.../C08_u	.../BM08-1	0,00060	.../C08_u	.../BM08-2	0,00049
.../C09_u	.../BM08-1	0,00053	.../C09_u	.../BM08-2	0,00033
.../C14_u	.../BM14-1	0,00037	.../C14_u	.../BM14-2	0,00023
.../C15_u	.../BM14-1	0,00035	.../C15_u	.../BM14-2	0,00017
.../C19_u	.../BM19-1	0,00069	.../C19_u	.../BM19-2	0,00021
.../C20_u	.../BM19-1	0,00055	.../C20_u	.../BM19-2	0,00012
.../C29_u	.../BM29-1	0,00055	.../C29_u	.../BM29-2	0,00040
.../C30_u	.../BM29-1	0,00030	.../C30_u	.../BM29-2	0,00028

TABLE 22 – Écart maximal pour chaque point ZFL suite à une étude entre les Shutdowns de mars et juin 2015

Au vu des résultats, seule cette hauteur sera mesurée à chaque fois qu'il est nécessaire de déterminer les points ZFL de la ligne de lumière concernée.

### 3.2.4 Conclusion

L'analyse des résultats obtenus précédemment nous permet de conclure que la mise en oeuvre pratique pour la détermination de points ZFL à n'importe quel moment ne nécessite pas de refaire toutes les mesures du cheminement pour obtenir des résultats corrects. Il s'avère que les mesures faites dans l'anneau de stockage et servant pour le transfert entre l'anneau de stockage et le toit ne sont pas indispensables. Seules les mesures issues de la station sur le tripode de la ligne de lumière souhaitée sont nécessaires. Ainsi, cela permet de réduire de manière significative le temps accordé à la mise en oeuvre pratique.

## 3.3 Mise en oeuvre pratique

Afin que le faisceau arrive dans la cabine expérimentale, le rôle de la cabine optique est crucial car elle permet d'ajuster son emplacement. Généralement les instruments optiques ont une certaine marge de manoeuvre latéralement, mais l'altitude est un facteur important. Il est donc nécessaire de connaître les altitudes des points du réseau de nivellement en temps réel.

L'analyse des premières données obtenues par la méthode présentée précédemment pour la détermination des points ZFL selon la composante verticale a permis la validation de cette dernière. Plusieurs améliorations y ont également été apportées afin de réduire l'influence de la longueur des portées ou encore d'affiner le traitement des mesures en utilisant des constantes plus proches de la réalité.

Cette partie est consacrée à la description du fonctionnement de cette méthode lors de sa mise en application. Ainsi elle répondra aux questions suivantes :

- Quel protocole doit être mis en oeuvre afin de déterminer l'altitude d'un point ZFL ?
- Comment se déroule le traitement des mesures ?
- Avec quelle incertitude obtient-on les altitudes des points ZFL ?

### 3.3.1 L'application terrain

La détermination des altitudes des points ZFL peut à présent s'effectuer à la suite d'une demande d'intervention sur une ligne de lumière et cela même entre deux Shutdowns. Cette détermination supplémentaire garantit l'utilisation d'une valeur de la composante verticale la plus juste possible pour l'installation et le contrôle des éléments au sein des lignes de lumière.

L'application de cette méthode nécessite avant toute chose de s'assurer du bon fonctionnement des capteurs que nous souhaitons utiliser. De plus, il ne faut pas négliger le temps de chauffe de l'appareil si nous

souhaitons atteindre des précisions inférieures au dixième de millimètre sur les dénivelées. Un temps minimal de 1 h 30 de chauffe est recommandé.

Les mesures à effectuer sur le terrain se composent uniquement des stations sur les tripodes reliant les capteurs HLS du toit aux points ZFL que nous souhaitons déterminer. Chaque point visé sera mesuré trois fois. Les mesures faites dans l'anneau de stockage ainsi que celles permettant le transfert de l'anneau de stockage vers le toit du tunnel réalisées lors du dernier Shutdown sont utilisées car l'analyse de leur évolution montre une stabilité dans le temps suffisante. Concernant la hauteur du capteur mesurée à l'aide du trusquin, elle n'est également plus à déterminer car elle a déjà été mesurée et cette hauteur est considérée constante dans le temps.

Les données issues des capteurs HLS utilisés seront également à récupérer afin de les intégrer dans le calcul du traitement des mesures.

### **3.3.2 Le traitement des mesures**

#### **Principe**

La détermination des Survey Monuments faite lors des Shutdowns sert de référence altimétrique dans la méthode proposée. Cependant, l'existence de mouvements de terrain, ne permet pas de réutiliser les coordonnées altimétriques de ces points en l'état. La présence du réseau de capteurs HLS installés sur les poutres permet de quantifier ces mouvements. Ainsi, la détermination de la variation d'altitude des Survey Monuments est faite en effectuant la différence d'écart pour chaque capteur HLS par rapport au plan moyen de tous les capteurs entre le dernier Shutdown et l'instant de la nouvelle prise de mesures. La référence du calcul reste toujours les coordonnées des Survey Monuments déterminées lors du dernier Shutdown mais en tenant compte d'un décalage temporel pris en compte en tant qu'observation.

Les mesures réalisées au sein de l'anneau de stockage et celles reliant l'anneau de stockage au toit lors du dernier Shutdown sont considérées comme inchangées et sont donc utilisées dans le traitement. Seules les mesures permettant le lien entre les HLS du toit et les points ZFL sont à redéterminer. La prise en compte des lectures des capteurs HLS lors de la nouvelle détermination est également nécessaire.

Suite aux analyses et résultats obtenus précédemment, le traitement des mesures tient compte de certains paramètres :

- la constante du zéro de lecture de tous les capteurs HLS utilisés,
- la correction des dénivelées de la courbure terrestre,
- l'erreur systématique de la correction atmosphérique sur la distance pour les visées vers les points ZFL d'une valeur de  $2,5 \mu\text{m}$ ,
- un poids adapté selon le type d'instrument utilisé.

#### **L'application du traitement**

Un calcul a été effectué pour chaque ligne de lumière choisie avec les mesures issues du Shutdown du mois de mars 2015 pour les mesures inchangées et celles issues du Shutdown du mois de juin 2015 pour les stations depuis le tripode visant notamment les points ZFL ainsi que pour les lectures des capteurs HLS. En pratique les mesures issues du Shutdown de mars auraient fait place à celles de juin dans le traitement des mesures. Cependant, cette configuration a été choisie afin de pouvoir comparer les résultats que l'on obtient avec ceux issus des calculs de la méthode proposée et celle des campagnes de nivellement à l'aide des mesures réalisées lors du Shutdown de juin.

Nom des points	altitude méthode HLS depuis mars (m)	écart altitude méthode HLS juin (m)	écart altitude campagne nivellement juin (m)
EXPH/A-ZFL/BM01-1	205,29772	-0,00014	0,00007
EXPH/A-ZFL/BM01-2	205,31333	-0,00014	0,00023
EXPH/A-ZFL/BM08-1	205,30722	-0,00017	0,00025
EXPH/A-ZFL/BM08-2	205,32378	-0,00017	0,00017
EXPH/A-ZFL/BM14-1	205,29289	-0,00014	0,00031
EXPH/A-ZFL/BM14-2	205,30415	-0,00014	0,00027
EXPH/A-ZFL/BM19-1	205,29651	-0,00019	0,00047
EXPH/A-ZFL/BM19-2	205,31937	0,00002	0,00049
EXPH/A-ZFL/BM29-1	205,30429	-0,00014	0,00016
EXPH/A-ZFL/BM29-2	205,31833	-0,00014	0,00023

TABLE 23 – Résultats de la mise en œuvre pratique et comparaison avec les deux autres méthodes

Nous obtenons ainsi des écarts faibles avec la méthode utilisant le système HLS avec une **moyenne des écarts de -0,14 mm** et un **écart-type associé de 0,06 mm** contrairement aux résultats issus de la campagne de nivellement présentant des **écarts en moyenne de 0,27 mm** avec un **écart-type de 0,13 mm**. Les résultats semblent cohérents car ils sont plus proches de la méthode présentant le même principe de mise en œuvre. De plus, comme nous l'avons vu précédemment, l'incertitude globale élargie associée à la détermination de ces points ZFL est de 0,327 mm.

Cependant, des écarts importants persistent au niveau de la ligne BM19 avec un écart de quasiment 0,5 mm avec les résultats issus de la campagne de nivellement.

Serait-ce dû au fait que seuls ces points ZFL sont visés de deux stations différentes, l'une étant la station sur le tripode situé sur le toit et l'autre étant la station qui sert de transfert entre le pot HLS du réseau de l'anneau de stockage et celui du toit d'où les points ZFL sont visibles ? Pour l'instant cet écart reste sans explication.

### 3.4 La méthode proposée aurait-elle ses propres limites ?

#### 3.4.1 Automatisation du procédé

Afin de faciliter la mise en œuvre pratique, l'automatisation du procédé a été jugée utile. En effet, il serait intéressant d'avoir un programme permettant d'obtenir directement les coordonnées altimétriques des points ZFL souhaités après avoir fait les mesures nécessaires à leur détermination.

Pour ce faire, un exécutable à partir de LabVIEW a été réalisé afin de faciliter et surtout automatiser la prise de mesures des stations effectuées sur les tripodes présents sur le toit. Actuellement seules les lignes de lumière choisies ont été intégrés à l'exécutable.

Cependant l'automatisation de l'ensemble du processus, comportant non seulement la prise de mesures mais aussi la collecte des données issues des capteurs HLS utilisés et surtout le traitement à proprement dit des données, semble délicat à automatiser en intégralité de manière simple et rapide. Cela nécessite l'accès automatique au programme permettant l'obtention des lectures des capteurs mais aussi l'adaptation du calcul automatiquement suivant la ligne de lumière choisie.

Ainsi l'automatisation des calculs serait complexe à mettre en place, ce qui implique que dans un premier temps la détermination des altitudes des points ZFL nécessiterait un traitement conséquent au préalable.

### 3.4.2 La comparaison générale

Une comparaison générale des résultats obtenus lors des différents Shutdowns des mois de janvier, mars et juin 2015 a pu être effectuée. Pour chaque Shutdown, la moyenne des écarts entre les résultats issus de la méthode utilisant le système HLS et ceux issus des campagnes de nivellement ainsi que l'écart-type associé sont recensés dans le tableau suivant :

	Janvier	Mars	Juin
moyenne des écarts (mm)	0,343	0,096	0,402
écart-type sur les écarts (mm)	0,089	0,069	0,117

TABLE 24 – Analyse des écarts entre les deux méthodes au cours des trois Shutdowns

En comparant les trois Shutdowns, il semblerait qu'il y ait une constante positive toujours présente entre les deux différentes déterminations de l'altitude des points ZFL. En effet, par la méthode proposée nous obtenons des altitudes toujours plus élevées que celles issues des campagnes de nivellement.

Cependant, nous ne pouvons nous fier totalement aux résultats du mois de janvier car les mesures n'ont pas été réalisées de la même manière qu'en mars et en juin : les mesures ne sont pas identiques et les capteurs HLS de l'anneau de stockage ne possédaient pas de support de prisme magnétique, ce qui rend l'emplacement du prisme plus aléatoire de par la non-certification de la planéité de la surface supérieure des capteurs qui y est associée. Mais cela permet malgré tout de donner un ordre de grandeur des résultats possibles.

Ainsi la moyenne des écarts obtenue pour chaque Shutdown semble être supérieure ou de l'ordre de l'incertitude associée aux points ZFL, dont la valeur de l'incertitude globale élargie maximale est de 0,327 mm, ce qui paraît curieux. De ce fait, il semblerait bien y avoir un paramètre constant qui nous échappe.

Y aurait-il un lien avec les conditions atmosphériques changeants au cours des saisons et la non-prise en compte de la réfraction atmosphérique correctement ?

Il a été remarqué que le lieu de la station visant les points ZFL avait une influence. En effet, les résultats ne sont pas identiques si la station se situe au niveau du toit ou si elle se situe dans le hall expérimental. Un test a été réalisé sur la ligne de lumière BM29. Deux démarches, énoncées page 20, ont été effectuées afin de relier les pots HLS présents sur le toit aux points ZFL situés dans le hall expérimental :

- une seule station sur le toit (tripode) reliant directement les pots HLS aux points ZFL,
- une station sur le toit reliant les pots HLS au tripode visible depuis le hall, et une deuxième station dans le hall expérimental en reliant le tripode du toit et les deux points ZFL de la ligne de lumière.

La première démarche avait été retenue pour sa simplicité de mise en œuvre sur le terrain. Ainsi nous avons obtenus les résultats suivants pour les deux démarches envisagées en effectuant les mesures lors du Shutdown de juin :

	altitude ZFL-1 (m)	altitude ZFL-2 (m)
une station	205,30444	205,31848
deux stations	205,30438	205,31852

TABLE 25 – Altitudes des points ZFL obtenus par les deux démarches

La différence de résultats ci-dessus pourrait être une explication des problèmes rencontrés lors de la détermination des points ZFL de la ligne de lumière BM19 présentant les deux types de démarches au sein d'un même calcul. Serait-ce en lien avec la non-prise en compte de la correction de la réfraction atmosphérique correctement ? Effectivement, nous avons pu constater des écarts de température et de

pression entre le lieu de la station sur le toit et les points ZFL visés. Ainsi la station dans le hall expérimental viserait les points ZFL dans un milieu davantage homogène que depuis la station sur le toit.

De plus, il s'avère que plus le gradient de température est élevé, plus les corrections qu'il faudra appliquer aux mesures seront importantes. Ainsi nous avons davantage d'erreurs dans les calculs lorsque la station vise des points dans un milieu hétérogène, ce qui semble être le cas lorsque la station s'effectue sur le toit.

Enfin, s'il est vrai que les conditions atmosphériques sont responsables des écarts restants entre la méthode proposée et celle des campagnes de nivellement pour la détermination des points ZFL, il semblerait que l'une des limites de la méthode utilisant le système HLS soit la prise en compte des conditions atmosphériques qui sont des paramètres difficiles à appréhender et à modéliser avec précision.

# CONCLUSION

Afin de répondre à la problématique posée par la présence de mouvements de terrain et l'impossibilité de mettre à jour les coordonnées des points ZFL en dehors des Shutdowns, une méthode s'appuyant sur l'utilisation des réseaux HLS déjà présents au sein de l'ESRF a été mise en place. La méthode proposée repose sur un transfert de hauteur depuis la référence altimétrique du système de coordonnées géodésique plan et local, les Survey Monuments, jusqu'aux points ZFL situés dans le hall expérimental.

Des améliorations ont été apportées afin de correspondre au mieux à la réalité terrain, parmi lesquelles la détermination de la constante du zéro de lecture des capteurs HLS ou encore celle d'une incertitude plus adaptée liée directement à la distance de visée, constituant le paramètre ayant le plus d'influence dans le calcul d'incertitudes.

Cependant, la correction de la réfraction atmosphérique, importante pour les observations issues d'instruments optiques, ne peut être corrigée correctement pour les visées présentant un gradient de température et de pression comme par exemple lorsque la station se trouve sur un tripode et une visée sur un point ZFL est effectuée. En effet, l'appareil possédant sa propre sonde peut mesurer les conditions atmosphériques au niveau de l'appareil mais ne tient pas compte de celles au niveau du point visé. De ce fait, une magnitude d'erreurs commise en ne tenant pas compte des conditions atmosphériques sur tout le chemin optique a été intégrée dans le calcul d'incertitudes en fonction de la distance et de l'angle vertical.

Malgré tout, les résultats obtenus des calculs d'incertitudes semblent encourageants. En effet, ces derniers ont permis de valider la méthode proposée.

De plus, des études sur la fréquence nécessaire des mesures, nous ont prouvé que la contrainte de rentrer dans l'anneau de stockage n'existe plus, ce qui permet une mise en œuvre simplifiée de la méthode.

Cependant, il semblerait qu'un paramètre ne soit pas pris en compte car nous pouvons observer des écarts positifs entre les résultats issus de la méthode proposée et ceux issus des campagnes de nivellement, qui sont toujours plus basses, pour les trois Shutdowns réalisés en janvier, mars et juin 2015.

En outre, nous avons constaté que le lieu de la station lors du transfert entre les pots HLS sur le toit et les points ZFL pouvait influencer les résultats. Ainsi, les résultats obtenus sont différents selon que la station se trouve sur le toit de l'anneau de stockage ou dans le hall expérimental. Les conditions atmosphériques semblent donc jouer un rôle non négligeable.

Il serait alors intéressant d'étudier le phénomène de réfraction atmosphérique en intérieur, afin de pouvoir appliquer les corrections les plus appropriées et permettant d'obtenir des résultats plus justes et précis.

L'utilisation de deux stations pour le transfert entre les pots HLS du toit et les points ZFL permettrait non seulement de réduire les distances de visée mais aussi d'éviter des visées dans un milieu hétérogène. Cependant, le processus de mise en œuvre s'en trouverait complexifié. La comparaison de cette démarche avec celle de la méthode proposée, avec une unique station, pourrait éventuellement permettre d'en apprendre davantage sur l'écart constaté entre la méthode utilisant le système HLS et les campagnes de nivellement.

Pour conclure, la méthode proposée et étudiée est intéressante car elle répond à la problématique en obtenant des incertitudes plus que raisonnables. Cependant, elle pourrait se confronter à certaines limites, liées notamment aux variations des conditions atmosphériques dans un environnement intérieur différent de celui observable en extérieur.



# BIBLIOGRAPHIE

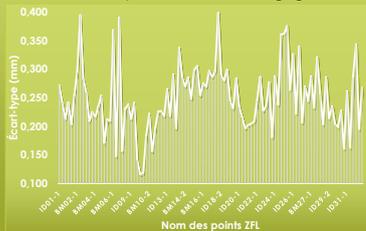
- [1] Base de données de l'ESRF
- [2] LETEURTRE Patrick, 2003, Surveillance et diagnostic de comportement d'ouvrage par nivellement hydrostatique de précision, Revue XYZ, n°94.
- [3] PASSOT Benoît, 2008, Nivellement indirect de l'anneau de stockage de l'ESRF, PFE INSA.
- [4] BOEREZ Julien, 2005, Analyse des données HLS de l'ESRF, TFE ESGT.
- [5] <http://www.kinematics.com>
- [6] GATTA Gilles, 2011, Global Compensation Program, User Notice (document en interne de l'ESRF).
- [7] Leica Geosystems, 2010, AT401 Absolute Tracker User Manual, pages 62-63.
- [8] <http://www-physique.u-strasbg.fr/udp/articles/Courssurlesincertitudes.pdf>
- [9] CALI José, Janvier 2014, Cours de topométrie de précision, Interférométrie appliquée à l'étalonnage des distancemètres, ES2, ESGT.
- [10] CHAURAND Rémy, 2011, Optimisation de la mesure de l'anneau de stockage de l'ESRF avec un laser tracker AT401 Leica, PFE INSA.

# POSTER SCIENTIFIQUE



## Des mouvements de terrain non négligeables

Du fait de sa localisation, le site de l'ESRF est sujet à des mouvements de terrain. Malgré leur observation depuis plusieurs années, ils restent difficiles à prédire avec précision. Les tolérances exigées étant très faibles, ces mouvements de terrain ne peuvent être négligés.



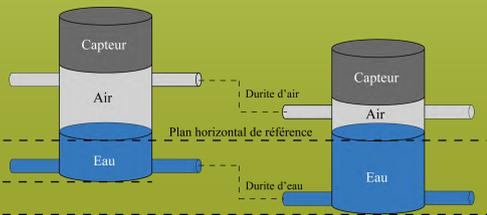
De ce fait, la détermination des coordonnées des points du réseau de référence issue des campagnes de nivellement réalisées lors des cinq Shutdowns annuels, ne suffit plus.

En effet, le rattachement des points du réseau à la référence située dans l'anneau de stockage, dans lequel les électrons sont stockés à énergie constante, n'est possible qu'au cours de ces périodes d'arrêt de la machine. Ainsi, afin d'avoir un réseau de points de nivellement au sol correspondant le plus possible à la réalité terrain, l'obtention des résultats en temps réel est nécessaire.

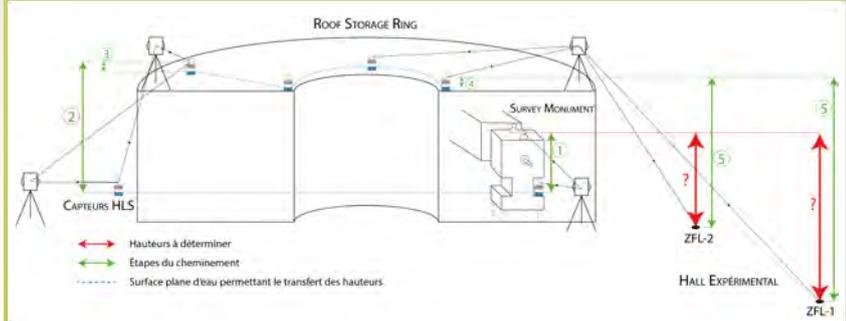
## Le système de nivellement hydrostatique (HLS)

Les deux réseaux de capteurs HLS présents à l'ESRF pourraient répondre à cette problématique. En effet, leur fonctionnement autonome permettrait de s'affranchir du besoin d'accéder à l'anneau de stockage.

- Mesure de nivellement en continu et de haute précision entre plusieurs points
- Principe des vases communicants
- Liquide soumis uniquement à la gravité sert de plan horizontal de référence
- Mesure de capacité sans contact proportionnelle à la hauteur du liquide dans le pot



## La méthode proposée



- Référence altimétrique constituée des Survey Monuments, situés à une distance constante du faisceau (450 mm)
- Somme de mesures successives de plusieurs hauteurs
- Plusieurs techniques de mesures avec précision associée :
  - LaserTracker AT401 Leica pour les dénivelées indirectes (distance  $\pm 5 \mu\text{m}$ , angle  $\pm 7,5 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m/m}$ )
  - Trusquin pour les hauteurs capteurs (50  $\mu\text{m}$ )
  - Lecture capteurs HLS (2  $\mu\text{m}$ )
- 5 lignes de lumière et 5 poutres choisies, équitablement réparties, pour valider la méthode.

$$H_{SM-ZFL} = -H_{SM-HLS1}^{SR} - h_{HLS1}^{HLS} - l_{capteur1}^{SR} + l_{capteur2}^{SR2} + h_{HLS2}^{SR2} + H_{HLS2-HLS3}^{SR2-roof} - h_{HLS3}^{roof} - l_{capteur3}^{roof} + l_{capteur4}^{roof} + h_{HLS4}^{roof} - H_{HLS4-ZFL}^{roof}$$

Un calcul d'incertitudes montre que l'incertitude globale élargie maximale associée à la détermination d'un point ZFL est de 0,327 mm. Cela permet de valider la méthode employée. Cependant, la comparaison avec les résultats issus des campagnes de nivellement lors des 3 derniers Shutdowns montre un écart relativement constant. Un paramètre ne serait pas pris en compte.

## Conclusion et perspectives

Ainsi la méthode proposée a été validée par un calcul d'incertitudes. Cependant les altitudes des points ZFL obtenues par cette méthode présentent un écart s'apparentant à une constante par rapport à celles obtenues par les campagnes de nivellement.

### Qu'elle pourrait être l'origine de ces écarts ?

L'hypothèse principale pour expliquer ces écarts serait liée à la réfraction atmosphérique non corrigée correctement, en particulier pour les visées lointaines et inclinées sur les points ZFL. En effet, les conditions atmosphériques ne sont mesurées qu'au niveau de la

station. Ainsi, les variations de paramètres se traduisant par des gradients de pression, température, humidité le long du chemin optique, dus à l'emplacement notamment des souffleries et de la protection ou non des points ZFL ne sont pas prises en compte. Malgré la prise en compte dans le calcul d'incertitudes de cette magnitude d'erreurs commises, les visées à partir d'un tripode sur point ZFL s'avèrent entachées d'une erreur de par une correction non adaptée à la situation.

L'étude du phénomène de réfraction atmosphérique en intérieur serait intéressant afin d'appliquer les corrections les plus appropriées possibles pour obtenir des résultats plus justes et précis.





# RÉSUMÉ

# Étude du transfert en temps réel de la hauteur de l'anneau de stockage de l'ESRF au sol du hall expérimental à l'aide du système de nivellement hydrostatique

*Du fait de sa localisation, le site de l'ESRF est sujet à des mouvements de terrain. Malgré leur observation depuis plusieurs années, ils restent difficiles à prédire avec précision. Les tolérances exigées étant très faibles, ces mouvements de terrain ne peuvent être négligés. De ce fait, la détermination des coordonnées des points du réseau de référence, issue des campagnes de nivellement réalisées lors des différents Shutdowns, ne suffit plus. Afin d'avoir un réseau de points de nivellement au sol correspondant le plus possible à la réalité terrain, l'obtention de résultats en temps réel est nécessaire.*

## Fonctionnement de l'ESRF

L'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) à Grenoble met à disposition des scientifiques les rayons X les plus brillants d'Europe afin d'explorer la matière sous toutes ses formes.

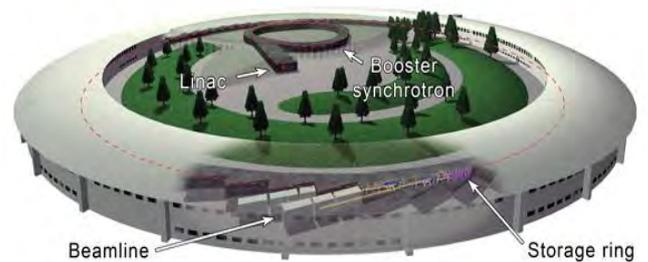


Figure 1 - Les éléments principaux du Synchrotron de l'ESRF

## Qu'est-ce qu'un Shutdown ?

Un Shutdown est une période d'arrêt de la machine lors de laquelle le faisceau d'électrons est coupé afin d'effectuer la maintenance de la machine.

Ils sont au nombre de 5 par année et il en existe deux types :

- Les « petits Shutdowns », au nombre de 3 par an, durent une semaine et sont consacrés aux campagnes de nivellement qui consistent en la redétermination des points de nivellement ZFL situés dans le hall expérimental,
- Les « grands Shutdowns », au nombre de 2 par an (Août et Décembre), sont consacrés à la redétermination de tous les points du réseau de référence.

Lors des campagnes de nivellement, le réseau de points ZFL est mesuré par nivellement direct à l'aide du niveau DIN12 en effectuant le tour de la couronne périphérique. Un rattachement est alors réalisé à la référence constituée des Survey Monuments présents au sein de l'anneau de stockage.

Au sein de l'installation, les électrons générés et accélérés par le LINAC et le Booster sont redirigés vers l'anneau de stockage (Storage Ring) où ils sont contraints de suivre une trajectoire courbe de par la présence d'aimants de courbure. Cette trajectoire entraîne la formation d'un rayonnement synchrotron émis de manière tangentielle à l'anneau de stockage et dirigé vers les lignes de lumière situées dans le hall expérimental et dans lesquelles se déroulent les expériences. À l'intérieur de l'anneau de stockage, les aimants de courbure et les aimants de focalisation, permettant de corriger la dispersion de l'énergie du faisceau, sont fixés sur des poutres.

## Contexte

La situation géographique de l'entreprise, au confluent du Drac et de l'Isère, près de nappes phréatiques, d'un barrage et au voisinage des Alpes, entraîne des mouvements de terrain non négligeables. Des observations de ces mouvements ont été réalisées sur une période de trois ans. Les écarts-types associés aux altitudes de chaque point ZFL sont représentés sur le graphique ci-après.

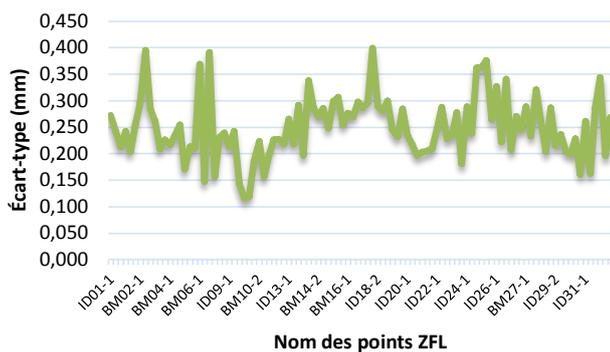


Figure 2 – Écarts-types des mouvements de terrain observés sur les points ZFL sur une période de 3 ans

De par les tolérances exigées à l'ESRF, un écart-type moyen de mouvements de terrain de 0.25 mm avec une amplitude associée variant de 0.32 à 1.74 mm sur une période de trois ans rendent les variations d'altitudes importantes. Ainsi une mise à jour régulière du réseau géodésique, surtout en altimétrie, est nécessaire.

Or, une spécificité de l'entreprise est l'importance de la position verticale du faisceau d'électrons qui constitue la référence altimétrique du système de coordonnées plan et local de l'ESRF.

Cependant, la position exacte du faisceau d'électrons à un instant donné, n'est pas mesurable directement. De ce fait, des repères fixés sur les éléments des poutres, matérialisant un point précis et permettant le centrage forcé ont été installés. Ces repères sont appelés Survey Monuments. Ainsi, la distance entre le faisceau et ces Survey Monuments est considérée comme constante.

La mise à jour du réseau géodésique des points situés dans le hall expérimental nécessite le rattachement de ces points à la référence constituée des Survey Monuments placés dans l'anneau de stockage. Cependant, cette manipulation ne peut s'effectuer que lors des périodes de Shutdowns qui sont peu nombreuses.

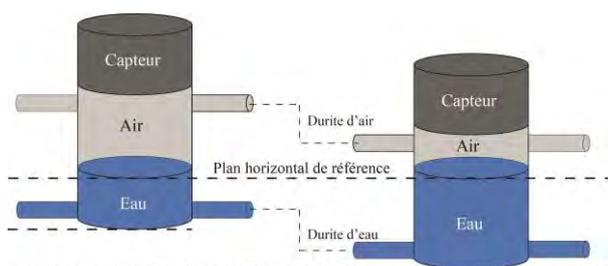


Figure 3 - Principe de fonctionnement des capteurs HLS

Du fait de la faible fréquence des Shutdowns et de l'effet des mouvements de terrain, les coordonnées des points au sol ne peuvent être considérées comme vraies que dans un délai temporel proche de la prise de mesures au cours du dernier Shutdown.

L'objectif visé par l'ESRF est donc d'obtenir un réseau de références connu en coordonnées en temps réel. Pour cela, il faudrait s'affranchir du besoin de l'arrêt machine pour effectuer le rattachement et déterminer les altitudes des points de nivellement situés dans le hall expérimental et servant de référence pour les lignes de lumière. Pour cela, le système de nivellement hydrostatique (HLS) déjà présent au sein de l'ESRF semble être adapté au problème.

En effet, deux réseaux HLS sont déjà en fonctionnement à l'ESRF, l'un étant dans l'anneau de stockage avec trois pots HLS sur chaque poutre et l'autre étant sur le toit de l'anneau de stockage. Ces capteurs HLS, fabriqués par l'entreprise Fogale Nanotech, présentent l'intérêt de fonctionner en autonomie, autrement dit, ils ne nécessitent pas de présence humaine. Ainsi, ce système non conventionnel permet de s'affranchir de l'obligation d'accéder à l'intérieur de l'anneau de stockage.

### Qu'est-ce qu'un système de nivellement hydrostatique ?

Le système HLS (Hydrostatic Levelling System) permet la mesure de nivellement entre plusieurs points en continu et avec une haute précision. Basé sur le principe des vases communicants, dont la surface d'un liquide est prise comme plan horizontal de référence, soumis uniquement à la gravité et non aux mouvements de l'environnement, le système composé de pots placés en réseau et reliés par des durites (air et eau), est régi par un équilibre hydrostatique.

Les variations d'altitude sont déduites des variations de niveau d'eau dans les pots, détectées par les capteurs capacitifs, dont les électrodes sont le capteur lui-même et la surface du liquide. La capacité mesurée sans contact est alors proportionnelle à la hauteur du liquide dans le pot. Ce principe est ainsi particulièrement adapté à une utilisation en relatif.

## Méthode mise en oeuvre

Les Survey Monuments étant donc considérés comme la référence du système de coordonnées de l'ESRF, la détermination des points ZFL situés dans le hall expérimental consiste en la mesure de la hauteur les reliant à l'aide des deux réseaux de capteurs HLS installés sur le site. Par le biais de l'utilisation d'une surface plane d'eau comme référence, le système de nivellement HLS a l'avantage de permettre de transférer une hauteur en n'importe quel point du réseau. Il serait ainsi intéressant de relier les deux réseaux entre eux, dans l'objectif d'atteindre n'importe quel point ZFL.

La nouvelle méthode envisagée afin de répondre à la problématique est donc basée sur la mesure successive de plusieurs hauteurs, déterminées par différentes techniques, dont l'utilisation du système HLS déjà en place au sein du site.

Trois types d'instruments sont alors nécessaires à la mise en place de cette méthode : les capteurs HLS d'une précision de lecture de  $2 \mu\text{m}$ , un trusquin d'une précision de  $50 \mu\text{m}$  et un Laser Tracker AT401 de Leica d'une précision sur la distance de  $\pm 5 \mu\text{m}$  et une précision angulaire de  $\pm 7.5 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m/m}$ , permettant de mesurer des dénivelées indirectes importantes sur de courtes distances de visée.

Cette méthode comporte alors plusieurs étapes illustrées par le schéma ci-dessous.

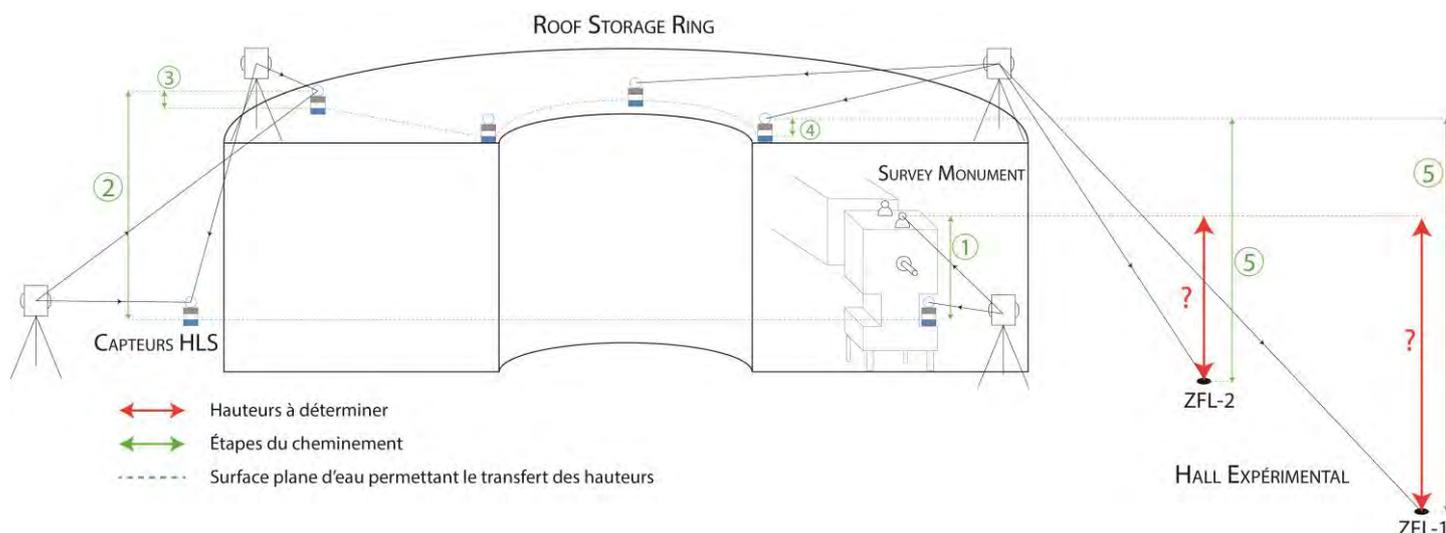
1. Détermination de la hauteur entre les Survey Monuments, connus en altitude, et la surface d'eau, référence pour le réseau de capteurs HLS présent dans l'anneau de stockage. Cette hauteur se décompose en une mesure à l'AT401 reliant les

Survey Monuments à la surface supérieure du capteur HLS présent sur la même poutre, une mesure au trusquin entre la surface supérieure du capteur et l'électrode, et la lecture du capteur donnant la hauteur entre l'électrode et la surface d'eau.

2. Détermination de la hauteur entre le capteur HLS du hall expérimental issu du réseau de l'anneau de stockage et celui du réseau du toit à l'aide de l'AT401.
3. Détermination de la hauteur entre le centre du prisme installé sur le capteur HLS du toit servant pour le transfert entre les deux réseaux (cf. 2) et sa surface d'eau de référence à l'aide d'une mesure trusquin et de la lecture du capteur.
4. Détermination de la hauteur entre la surface d'eau de référence associée au réseau du toit et le centre du prisme installé sur le pot HLS et qui est utilisé comme lien avec les points ZFL, par une lecture du capteur et une mesure trusquin.
5. Détermination de la hauteur entre le capteur HLS issu du réseau du toit et le point ZFL souhaité et situé dans le hall expérimental à l'aide de l'AT401.

Afin de tester la validité de la méthode, cinq lignes de lumière et cinq poutres différentes dans l'anneau de stockage ont été choisies de manière à être le plus équitablement réparties le long de l'anneau de stockage.

L'ajustement du réseau issu des mesures acquises par cette nouvelle méthode a été réalisé à l'aide du logiciel Global Compensation Program développé à l'ESRF.



Lors du calcul, des corrections ont dû être prises en compte pour les différentes hauteurs déterminées suite à une utilisation spécifique et non standard des capteurs HLS, en absolu et non plus en relatif, ou encore de par la présence de visées pouvant atteindre 50 m à l'AT401.

Un calcul d'incertitudes a été effectué, ce qui a permis de valider la méthode employée.

De plus, des études sur la fréquence nécessaire des mesures ont été réalisées prouvant que la contrainte de rentrer dans l'anneau de stockage n'existe plus, ce qui permet une mise en œuvre simplifiée.

Cependant, les résultats issus de la méthode proposée sont toujours plus élevés que ceux issus des campagnes de nivellement pour les trois Shutdowns réalisés en janvier, mars et juin 2015. Il semblerait qu'un paramètre ne soit pas pris en compte.

### Conclusion et perspectives

Ainsi la méthode proposée a été validée par un calcul d'incertitudes. Cependant les altitudes des points ZFL obtenues par cette méthode présentent un écart s'apparentant à une constante par rapport à celles obtenues par les campagnes de nivellement.

Il a été également constaté que le lieu de la station lors du transfert entre les pots HLS sur le toit et les points ZFL pouvait influencer les résultats. Ainsi, les résultats obtenus sont différents selon que la station se trouve sur le toit de l'anneau de stockage ou dans le hall expérimental.

Cela peut s'expliquer par la présence de gradients de température et de pression due à l'emplacement des souffleries, des espaces vides ou non ou encore l'emplacement même du point ZFL, s'il est protégé ou non.

De plus, la correction de la réfraction atmosphérique ne peut être corrigée correctement pour les visées dans un milieu hétérogène car l'appareil possédant sa propre sonde ne peut mesurer les conditions atmosphériques qu'au niveau de la station et ainsi ne tient pas compte de celles au niveau du point visé. Malgré la prise en compte dans le calcul d'incertitudes de cette magnitude d'erreurs commises, les visées s'effectuant à partir d'un tripode sur un point ZFL sont entachées d'une erreur de par une correction de la réfraction atmosphérique non adaptée à la situation.

Afin d'appliquer les corrections les plus appropriées possibles pour obtenir des résultats plus justes et précis, l'étude du phénomène de réfraction atmosphérique en intérieur serait intéressant.

L'utilisation de deux stations pour le transfert entre les pots HLS du toit et les points ZFL permettrait non seulement de réduire les distances de visées mais aussi d'éviter des visées présentant des variations des paramètres atmosphériques le long du chemin optique. Cependant, la mise en œuvre de la méthode en serait complexifiée. Nous pourrions éventuellement en apprendre davantage sur l'écart constaté entre la méthode de nivellement utilisant le système HLS et les campagnes de nivellement en effectuant une comparaison entre cette démarche, et celle composée d'une unique station et utilisée dans la méthode proposée.

Ainsi, la méthode proposée et étudiée est intéressante car elle répond à la problématique en obtenant des incertitudes plus que raisonnables. Cependant, elle pourrait se confronter à certaines limites, liées notamment aux variations des conditions atmosphériques entraînant un comportement de gradients de température, de pression ou encore d'humidité le long du chemin optique dans un environnement intérieur différent de celui observable en extérieur.



# RÉSUMÉ

## **Étude du transfert en temps réel de la hauteur de l'anneau de stockage de l'ESRF au sol du hall expérimental à l'aide du système de nivellement hydrostatique**

La situation géographique de l'European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) le soumet à des mouvements de terrain. Cependant, au vu des tolérances exigées au sein de l'ESRF, ces variations ne sont pas négligeables et une mise à jour régulière des coordonnées des points du réseau géodésique est indispensable.

Actuellement, ces mises à jour ne peuvent être réalisées que cinq fois dans l'année lors des périodes d'arrêt de la machine permettant le rattachement des points du réseau à l'anneau de stockage. Néanmoins, cette fréquence est insuffisante pour les besoins actuels. Une méthode alternative permettant le rattachement de tous les points de nivellement à la référence, constituée du faisceau, à n'importe quel instant doit donc être envisagée.

Cette étude présente donc une méthode de détermination des altitudes pouvant être réalisée hors des Shutdowns en s'appuyant sur les deux réseaux de nivellement hydrostatique HLS présents au sein de l'ESRF et qui permettent la détermination de dénivelées de haute précision en continu et de manière autonome.

*Mots-clés : Détermination de hauteurs, Système de nivellement hydrostatique, HLS, Calcul d'incertitudes, Nivellement*

# ABSTRACT

## **Study on the height determination between the Storage Ring and the Experimental Hall using the Hydrostatic Levelling System**

The European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) located at the confluence of the Drac and the Isère rivers at the foot of the Alps is strongly influenced by the underlying water table and is subjected to relatively low amplitude ground movements. However given the tolerances required in the ESRF, these variations are significant and the regular update of network coordinates is essential.

Currently, these updates can only be performed five times a year during periods when the machine is shutdown. This is because the link between the Storage Ring survey network and the Experimental Hall network can only be made during these times when there are no radiation generated. This update periodicity is not adequate for current needs. An alternative method for establishing the link between all of the levelling reference points at any time must be considered.

This study presents a method for determining altitudes which can be achieved outside of the shutdown based on a high precision Hydrostatic Levelling Network (HLS) available at the ESRF that provides the determination of high precision levelling independent of the survey networks and in real time.

*Keywords : Height determination, Hydrostatic Levelling System, HLS, Uncertainty Calculation, Levelling*